



Conseil Français de l'Énergie

Comité Membre du Conseil Mondial de l'Énergie
French Member Committee of the World Energy Council

Une approche multicritère de la vulnérabilité énergétique

Université Montpellier 1 - CREDEN

Rapport final - Contrat 63

2012

UNIVERSITE MONTPELLIER I

CREDEN

Centre de Recherche en Economie et Droit de l'Energie

Directeur Jacques PERCEBOIS, Professeur

(UMR CNRS Art-Dev « Acteurs, Ressources et Territoires dans le Développement » n° 5281)

Rapport final

Une approche multicritère de la vulnérabilité énergétique

Agnès d'Artigues et Thierry Vignolo¹

Juillet 2012

Etude réalisée grâce au financement du Conseil Français de l'Energie

¹ Nous remercions Jacques Percebois pour ses éclairages et ses remarques qui ont contribué à éviter bien des erreurs, Stéphane Roumeau pour son aide méthodologique. Nous remercions également le Conseil français de l'énergie pour le financement de cette étude.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	4
A. LA VULNERABILITE ENERGETIQUE : LES DEFINITIONS ENVISAGEES DANS LA LITTERATURE	7
A.1. Les différentes mesures de la vulnérabilité énergétique.....	7
A.1.1. Les indicateurs simples.....	7
A.1.1.1 L'estimation des ressources disponibles	7
A.1.1.2 Le ratio réserves sur production	8
A.1.1.3 La dépendance aux importations.....	8
A.1.1.4 La stabilité politique	8
A.1.1.5 Le prix de l'énergie	9
A.1.1.6 La diversité.....	9
A.1.2 Les indicateurs agrégés	9
A.1.2.1 L'indicateur de Shannon étendu	10
A.1.2.2 L'indice d'Offre/Demande	10
A.1.2.3 L'indice de sécurité énergétique de l'IEA.....	10
A.1.2.4 L'indice de vulnérabilité au pétrole.....	11
A.2. La diversité.....	12
A.2.1. Définition et propriétés de la diversité	12
A.2.2 Les mesures de la diversité (les indicateurs)	16
A.2.2.1 La théorie de la gestion de portefeuille appliquée à la diversité.....	17
A.2.2.2 Les indicateurs de diversité.....	18
A.2.3 Intérêts de la diversité.....	22
A.3. Les limites de la notion de diversité.....	24
A.3.1. Diversité versus efficience	24
A.3.2. Le prétexte de la diversité	24
A.3.3 Diversité et sécurité de l'approvisionnement.....	25
A.3.4. Les problèmes relatifs à l'application du la notion de diversité	25
A.3.5. La nouvelle méthodologie d'évaluation de la diversité proposée par Stirling	26
B. ANALYSE MULTICRITERE DE LA VULNERABILITE ENERGETIQUE	30
B.1. Méthodologie utilisée : l'analyse multicritère.....	30
B.1.1. Intérêt de l'analyse multicritère.....	30

B.1.2. L'approche opérationnelle retenue : l'agrégation partielle	32
B.1.3. Le choix de la méthode ELECTRE TRI : principes de la méthode et arguments en faveur du choix de cette méthode	34
B.2. Application de l'analyse multicritère	35
B.2.1. Critères de mesure de la vulnérabilité	36
B.2.2. Pondération des critères	42
B.2.3. Scénarios retenus	44
B.3. Résultats de l'analyse multicritère.....	45
B.3.1. Scénario 1 : Europe des 27 et critère I_1 de diversité des énergies primaires	45
B.3.2. Scénario 2 : Europe des 27 avec critère de disparité	59
B.3.3. Scénario 3 : Europe des 27, BRICs et Etats-Unis avec critère de diversité I_1	62
B.3.4. Scénario 4 : Europe des 27, BRICs et Etats-Unis avec critère de disparité	65
C. LA VULNERABILITE SYSTEMIQUE : DEFINITION ET MESURE.....	69
C.1. Littérature et définitions	69
C.2. Transposer la vulnérabilité systémique au problème de la sécurité d'approvisionnement énergétique	73
C.2.1 L'exposition.....	74
C.2.2 La sensibilité.....	76
C.2.3 L'adaptabilité	77
C.3. Formules et calculs.....	80
CONCLUSION	82
BIBLIOGRAPHIE.....	84

INTRODUCTION

Vulnérabilité énergétique et sécurité d'approvisionnement sont en réalité les deux faces d'une même pièce. En effet, on peut vouloir mesurer la vulnérabilité énergétique d'un pays ou bien, de manière équivalente, évaluer la sécurité de son approvisionnement énergétique. Dans la littérature, les deux appellations sont utilisées avec toutefois une préférence pour la seconde, sans doute parce qu'elle bénéficie d'une définition reconnue par tous.

La sécurité d'approvisionnement est définie comme la capacité d'un système énergétique à générer une offre suffisante à un prix abordable, de manière à ce que l'activité économique ne soit pas perturbée.

Les risques pouvant compromettre la sécurité énergétique sont par exemple une très forte hausse des prix de l'énergie, la réduction de la qualité (chutes de tension électrique), une interruption inopinée de l'offre ou des perturbations de long terme de l'offre.

La question de la sécurité de l'approvisionnement est au cœur de la politique énergétique des pays de l'OCDE depuis plus d'un siècle.² Pourtant, on ne dispose toujours pas aujourd'hui d'une approche standard qui puisse mesurer son niveau et sa possible évolution. Ce niveau est le plus souvent évalué à travers le jugement d'experts et manque par conséquent d'une méthode rigoureuse de détermination.

Il existe néanmoins plusieurs approches quantitatives cherchant à mesurer le degré de sécurité d'une stratégie d'approvisionnement. Les plus connues, mais aussi les plus simples, ont recours au calcul d'indicateurs évaluant par exemple la *dépendance aux importations* ou bien la *diversité* du mix énergétique.³ D'autres, plus récentes, adoptent des mesures hybrides ou des indicateurs agrégés ou encore établissent et comparent des scénarios probables.⁴

² IEA (2007).

³ Il existe bien d'autres indicateurs simples comme l'estimation des ressources disponibles, les ratios réserves/production, la stabilité politique, le prix de l'énergie et la liquidité du marché. Voir Kruyt *et al.* (2009) pour une liste détaillée.

⁴ Cf. Costantini *et al.* (2007) et Kruyt *et al.* (2009).

Par conséquent, il existe une multiplicité de types d'évaluation qui compromet en partie le pouvoir prédictif de l'analyse. En effet, vers quel type d'approche doit se tourner le décideur politique ? On comprend mieux pourquoi, in fine, les décideurs s'en remettent aux jugements subjectifs d'experts.⁵ Cette situation, caractérisée par l'absence d'une approche dominante, est en grande partie due à la nature même de la sécurité énergétique, qui présente plusieurs dimensions.

Le présent rapport se donne pour ambition de proposer des mesures de la vulnérabilité énergétique à partir de différentes approches.

La première partie du rapport (A) s'attache à présenter quelques définitions importantes concernant la vulnérabilité énergétique, faisant notamment suite aux éléments de définition développés dans le premier rapport sur la vulnérabilité énergétique confié au CREDEN par le Conseil Français de l'Energie (2008).

La deuxième partie du rapport présente une approche multicritère de la vulnérabilité énergétique à partir de la méthode ELECTRE TRI, appliquée aux pays de l'Europe des 27, aux BRICs (Brésil, Russie, Inde et Chine) et aux Etats-Unis. Cette méthode présente l'avantage de ranger les pays par groupe en fonction de leurs performances, évaluées sur la base de critères de vulnérabilité. L'ambition n'est donc pas de définir un classement du meilleur au moins bon, ce qui n'aurait pas beaucoup de sens ; en effet, comme cela vient d'être précisé, le choix des critères, les poids qui leur sont affectés dépendent généralement de critères subjectifs, reposant sur des débats d'experts, qui peuvent être facilement remis en cause. L'analyse de sensibilité inhérente à la méthode permet de revenir notamment sur les différents poids des critères, et de remettre en cause les groupes de pays initialement définis.

La troisième partie du rapport transpose le concept de *vulnérabilité systémique* au problème de la sécurité énergétique. Ce concept provient de l'écologie et des sciences dites de

⁵ Dans l'étude menée par Yoshizawa *et al.* (2008) au sujet du Japon et du Royaume-Unis, les auteurs évoquent la déception des deux gouvernements à l'égard des faibles performances réalisées par les décisions ayant suivi les diverses évaluations concernant la diversité du mix énergétique. Bien qu'ils demeurent convaincus qu'il faille poursuivre une action menant vers davantage de diversité, ils souhaiteraient une évolution des méthodes d'appréciation fournissant des techniques plus adaptées.

soutenabilité. Il a l'avantage, contrairement aux approches traditionnelles de vulnérabilité, d'offrir une structure générale permettant d'analyser comment un système détermine sa capacité à affronter les perturbations. Sur la base de cette notion de vulnérabilité systémique, un classement des pays est proposé.

A. LA VULNERABILITE ENERGETIQUE : LES DEFINITIONS ENVISAGEES DANS LA LITTERATURE

Nous allons exposer ici les diverses mesures de la vulnérabilité énergétique qui ont été proposées dans la littérature spécialisée, en insistant sur celles qui présentent le plus d'intérêt pour le présent rapport. Nous aborderons ensuite les critiques qui peuvent être faites à ces approches et les réponses qui peuvent être apportées.

A.1. Les différentes mesures de la vulnérabilité énergétique

Suite aux travaux de Kruyt *et al.* (2009), on peut distinguer les indicateurs simples où une seule dimension du problème est prise en compte, des indicateurs dits « composés » ou « agrégés ».

A.1.1. Les indicateurs simples

A.1.1.1 L'estimation des ressources disponibles

La disponibilité des ressources est bien évidemment cruciale dans l'évaluation de la sécurité de l'approvisionnement. On peut par exemple pour un pays donné distinguer les sources d'énergie principales et les confronter à l'estimation de leurs réserves. Cependant, il y a encore de grandes incertitudes quant à ces estimations concernant les hydrocarbures ce qui limite fortement l'utilisation isolée de cet indicateur comme mesure de la vulnérabilité énergétique.

A.1.1.2 Le ratio réserves sur production

Il est en général noté R/P et a été souvent utilisé comme mesure de la sécurité énergétique. Il prend en compte les années de production restantes par rapport à la production actuelle. On peut lui faire la même critique qu'à l'indicateur précédent.

A.1.1.3 La dépendance aux importations

C'est l'un des plus utilisés pour mesurer la sécurité énergétique. C'est le rapport importations nettes d'énergie sur consommation totale d'énergies primaires (TPES). Cet indicateur peut également être désagrégé par forme d'énergie (importation nettes de pétrole sur consommation de pétrole, par exemple). On peut également le désagréger en fonction de la zone géopolitique (dépendance vis-à-vis du Proche-Orient).

Certaines variantes de cet indicateur sont possibles. Notamment, Gnansounou (2008) propose un indicateur de la dépendance vis-à-vis du gaz et du pétrole incorporant d'une part les importations sur le TPES, d'autre part la concentration par zone géopolitique. On peut également combiner la dépendance aux importations avec des mesures de diversité, comme le fait le *Asian Pacific Energy Research Center*.

A.1.1.4 La stabilité politique

La situation politique des pays fournisseurs d'énergie est importante pour la sécurité d'approvisionnement d'un pays parce que les gouvernements contrôlent soient directement l'offre ou bien les conditions sous lesquelles cette offre est exploitée par d'autres.

L'Agence internationale de l'énergie utilise une mesure du risque politique en se référant à la moyenne de deux des six indicateurs de gouvernance élaborés par la banque mondiale : la stabilité politique et l'absence de violence d'une part, la qualité de la régulation d'autre part. On peut également se baser sur l'indice de développement humain (IDH).

A.1.1.5 Le prix de l'énergie

Dans un marché fonctionnant parfaitement, les prix assurent l'équilibre entre l'offre et la demande. Les prix représentent donc un indicateur de la relation entre l'offre et la demande et par conséquent ils sont le reflet de la raréfaction et de l'épuisement des ressources énergétiques.

Parmi les différents prix, celui du pétrole joue un rôle particulier. En effet, étant une énergie dominante dans la plupart des parties du monde, son prix est vu comme un indicateur important de sécurité énergétique. Cependant, son rôle doit être relativisé du fait de l'influence d'autres facteurs, tels que la spéculation, la communication stratégique et les pénuries de court terme.

A.1.1.6 La diversité

La diversité est en général présentée comme un outil opérationnel permettant de mettre en place des politiques efficaces de lutte contre les risques associés à l'offre énergétique (Jansen *et al.* (2004)). Intuitivement, il s'agit d'une traduction du vieil adage selon lequel « il ne faut pas mettre tous ses œufs dans le même panier ». L'idée est simple mais efficace lorsqu'on fait face à ce que Stirling appelle une incertitude « stricte ».

Concernant l'énergie, on peut évaluer la diversité des sources énergétiques comme de celles des fournisseurs. Il existe de nombreux indicateurs de diversité, souvent empruntés à l'écologie, dont le plus connu est sans aucun doute celui de Shannon-Wiener, sur lequel nous revenons en détail dans la section qui suit.

A.1.2 Les indicateurs agrégés

A.1.2.1 L'indicateur de Shannon étendu

Il s'agit d'un indicateur proposé par Jansen et al. (2004) basé sur l'indice de Shannon intégrant d'autres dimensions que la diversité. En effet, au-delà de la classique diversité des sources d'énergie, les auteurs retiennent également :

- la variété des fournisseurs associée à la dépendance vis-à-vis des importations,
- le risque politique lié aux pays fournisseurs, basé sur l'indicateur de développement humain de l'UNDP (United Nations Development Program),
- la raréfaction des ressources dont l'évaluation repose sur l'hypothèse un peu forte que les marchés répondent parfaitement à l'information concernant le ratio réserves/production (s'il chute en deçà d'une valeur de 50).

La principale critique qui est faite à cet indice de Shannon étendu concerne l'équilibre entre les différentes composantes, le poids de chacune d'elles étant fixé de manière arbitraire. L'autre critique porte sur l'existence d'un seuil concernant le ratio réserves/production, ce qui semble être une hypothèse peu réaliste.

A.1.2.2 L'indice d'Offre/Demande

Il s'agit d'un indicateur de long-terme produit sur la base de jugements d'experts et relatif à tous les aspects envisageables de la sécurité d'approvisionnement (Scheepers *et al.* (2007)). Il couvre notamment la demande, l'offre, la transformation et le transport de l'énergie sur le moyen et le long-terme.

La principale originalité de cet indice est l'appréhension du système énergétique dans sa globalité, ce qui est important dans la mesure où toute baisse de la demande réduit automatiquement les impacts liés à l'interruption de l'offre quelle qu'en soit l'origine.

A.1.2.3 L'indice de sécurité énergétique de l'IEA

L'Agence internationale de l'énergie propose deux indicateurs mesurant la sécurité énergétique. Le premier concerne l'indisponibilité physique de la ressource. Cet indicateur est défini comme la part de la demande d'énergie totale d'un pays fournie par gazoducs. L'idée ici est que les gazoducs ne donnent pas la possibilité aux consommateurs de changer de fournisseurs en cas d'interruption.

L'autre indicateur concerne le risque associé au prix sur les marchés où la concentration d'offreurs est importante. L'évaluation de cette concentration est réalisée à travers l'utilisation de l'indice de Herfindhal-Hirschman. Une mesure de l'instabilité politique des pays fournisseurs est par ailleurs ajoutée. Cette mesure de la concentration pour chaque marché est ensuite pondérée selon la part des combustibles dans l'offre d'énergie primaire.

Ici aussi, la critique majeure concerne l'équilibre entre la concentration de l'offre et l'instabilité politique car elle est effectuée de manière arbitraire. Par ailleurs, focaliser l'analyse de la sécurité énergétique sur la concentration du marché suppose une confiance un peu naïve dans le fonctionnement des marchés de l'énergie libéralisés. On regrettera également que la raréfaction des ressources soit ici ignorée.

A.1.2.4 L'indice de vulnérabilité au pétrole

Gupta (2008) propose un indice de vulnérabilité spécifique au pétrole et se concentre par conséquent sur les pays qui en importent le plus. Il s'agit de 26 pays importateurs nets qui se trouvent pour l'essentiel en Europe et en Asie.

Cet indicateur composite intègre 7 éléments :

- Le ratio pétrole sur PIB
- La consommation de pétrole par unité de PIB
- Le PIB par tête
- La part du pétrole dans l'offre d'énergie totale
- Le ratio réserve domestique sur consommation de pétrole

- L'exposition au risque de concentration géopolitique

- La liquidité des marchés

L'indice ainsi combiné est obtenu selon la méthode statistique appelée Analyse en Composantes Multiples. Elle permet d'éviter la subjectivité des experts dans la mesure où elle utilise la covariance des éléments pour établir leur poids respectif. Le seul inconvénient est l'extrapolation des variances statistiques afin d'obtenir des projections dans le futur.

A.2. La diversité

La notion de diversité est généralement présentée comme un rempart face à une incertitude « stricte » c'est-à-dire, une situation où la nature même des contingences possibles est inconnue. C'est en partie pour cette propriété vis-à-vis du risque que cette notion est largement utilisée dans l'analyse de la sécurité de l'approvisionnement.

De nombreuses disciplines scientifiques ont recours à la diversité, comme l'écologie (May (1975), McCann (2000)), la biologie (Maynard Smith (1989)) ou encore la physique (Schevchenko *et al.* (1996)). En économie, cette notion sert d'une part à l'analyse relative aux innovations (Gatsios et Seabright (1989), Geroski (1989)), et d'autre part aux questions concernant la sécurité de l'approvisionnement énergétique. Bien entendu, nous allons revenir en détail sur ce dernier point.

A l'origine, la diversité est une propriété commune à tout système dont les éléments peuvent être partitionnés en catégories (Leonard et Jones (1989)). Concernant l'énergie, le système peut être assimilé aux infrastructures générant de l'électricité (centrales), où les éléments sont représentés par différentes sources d'énergie primaire (charbon, gaz, pétrole, uranium, vent), qui peuvent être réparties en fonction de la technologie utilisée (nucléaire, thermique, éolien, etc.).

A.2.1. Définition et propriétés de la diversité

La diversité est un concept qui n'est simple qu'en apparence. En effet, il est fréquent d'associer cette notion au seul nombre d'éléments qui constituent un système, c'est-à-dire à sa *variété*. Ce peut être le nombre d'espèce ou celui d'options constituant le mix énergétique. C'est le critère que retiennent généralement les approches les plus conventionnelles : plus grande est la variété des différentes options, plus importante sera la diversité, *ceteris paribus*. Néanmoins, si la notion de diversité se résumait simplement à cette propriété, le domaine de son application serait extrêmement réduit. On serait en effet confronté aux limites concernant la comparaison de systèmes présentant un nombre identique d'options. Comment départager par exemple deux mix énergétiques composés tous deux de trois options ?

On peut alors, au-delà de la variété, ajouter une seconde propriété au concept de diversité : *l'équilibre*. Cette propriété mesure la contribution relative de chaque option au système, en attribuant à chacune une fraction positive dont la somme est égale à l'unité (Laxton (1978)). Pour un nombre d'options égal, on dira qu'un système est plus diversifié qu'un autre si les proportions des options le constituant sont plus équilibrées. Par exemple, si l'approvisionnement d'un pays est constitué de 30% de charbon et le reste de pétrole, alors il sera considéré comme étant « moins diversifié » que celui d'un autre pays où le charbon et le pétrole sont en proportions égales (Helms (2007)).

L'équilibre est une dimension de la diversité fréquemment invoquée dans les débats sur l'énergie, concernant la contribution des différentes offres possibles. Dans la majorité des cas, les indices dits d'« entropie » ou de « concentration » servent à l'analyse bien qu'ils posent un certain nombre de difficultés.⁶ Lorsque nous discuterons en détail de ces indicateurs, nous évoquerons également leurs limites et comment il est possible de les dépasser.

Les cas de la France et du Japon relatifs aux choix d'offre d'électricité après 1973 soulignent le rôle crucial de l'équilibre dans la diversité. Ces deux pays ont réduit leur dépendance vis-à-vis du pétrole par une stratégie de diversification en faveur d'une offre d'électricité provenant de centrales nucléaires. Cependant, alors que cette nouvelle offre est demeurée dans des proportions équilibrées au Japon, elle a atteint en France des proportions

⁶ Il s'agit pour l'essentiel des indices de Herfindahl-Hirschman et de Shannon-Wiener.

inquiétantes (IEA, 2002). En effet, sur une trentaine d'années, la France est passée d'une dépendance initiale vis-à-vis du pétrole de 40% à une dépendance au nucléaire de 77%. Ce cas démontre qu'une stratégie de diversification peut paradoxalement déboucher sur une réduction de la diversité par rapport à la situation de départ.

Mais qu'en est-il de la priorité entre variété et égalité ? Si, par exemple, un système est composé de quatre options mal équilibrées, et qu'un autre présente seulement trois options mais bien équilibrées, lequel sera considéré comme plus diversifié ? Comme nous le verrons avec les indicateurs de diversité, notamment ceux de Herfindahl-Hirschman et de Shannon-Wiener, il n'y a habituellement pas de priorité explicitement revendiquée pour l'une ou l'autre de ces deux propriétés, bien que l'exposant choisi en reflète une par défaut.⁷

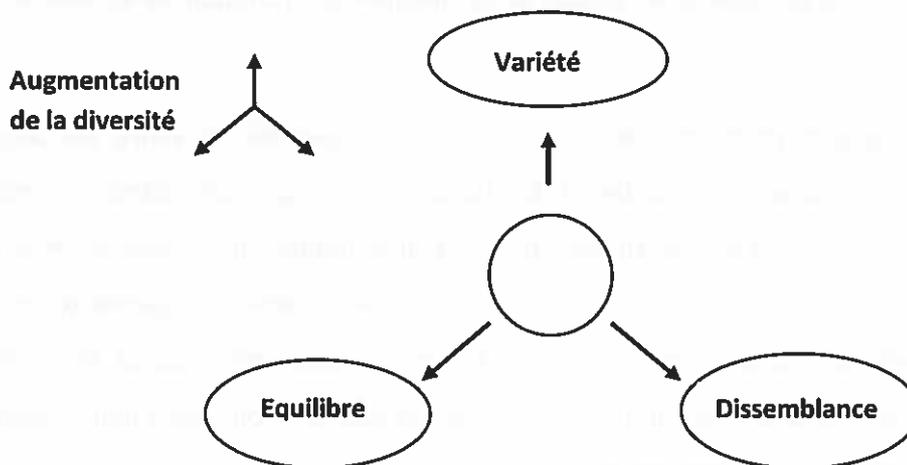
Néanmoins, si la variété et l'égalité sont des conditions nécessaires à la diversité, elles ne sont pas suffisantes (Stirling (1994)). Il faut en effet en rajouter une troisième : la *dissemblance*. Par dissemblance, on entend le degré de différenciation des options entre elles, selon leurs caractéristiques intrinsèques. Cependant, contrairement à la variété et à l'équilibre, cette troisième propriété de la diversité est difficile à évaluer au travers d'indicateurs simples (les indicateurs classiques tels que ceux de Herfindahl-Hirschman et Shannon-Wiener n'en tiennent pas compte). Comme nous le verrons plus loin, il s'agit d'une propriété *subjective* par essence parce qu'elle présente un nombre important de dimensions nécessitant de multiples critères d'évaluation. Nous montrerons également que l'analyse de la diversité sans mesure de la *dissemblance* est de portée limitée.

Tout l'enjeu de l'évaluation de la diversité d'un système par des indicateurs tient à la recherche d'une méthodologie permettant une mesure cohérente de cette troisième propriété. L'analyse multicritère de la diversité proposée par Stirling est une de ces méthodologies.⁸

Stirling (2010) propose une présentation synthétique et élégante de ces trois propriétés constituantes de la diversité :

⁷ L'Indice de Shannon-Wiener considère davantage l'équilibre entre les options que ne le fait celui de Herfindahl-Hirschman).

⁸ Multicriteria mapping (MCM) process, Stirling (1997).



Comme le montre le schéma ci-dessus, renforcer la diversité d'un système nécessite l'augmentation de la *variété* des options qui le compose, tout en considérant à la fois l'*équilibre* des proportions ainsi que la *dissemblance* entre les options.

A partir de là, on conçoit aisément que tout indicateur de diversité doit pouvoir agréger variété, équilibre et dissemblance tout en explicitant le choix de priorités entre elles (Hill (1973)).

Concernant le mix énergétique, la diversité peut dans ce cadre être définie comme *une variété d'options mutuellement dissemblables dont les proportions sont équilibrées*. Les options énergétiques peuvent être des sources d'énergies primaires, comme le charbon ou le pétrole, ou bien un type de technologie transformant une énergie primaire, comme une centrale nucléaire ou thermique. Ainsi, de nombreuses études se sont intéressées à la diversité de l'offre d'électricité, en prenant comme options des catégories telles que le charbon, le gaz, le nucléaire et les renouvelables, cette dernière pouvant être subdivisée en hydraulique, biomasse, éolien et solaire.⁹ Bien entendu, lorsqu'on compare le degré de diversité des mix énergétiques de deux pays, il convient de tenir compte de toutes les options retenues par ces pays. Si, par exemple, on souhaite comparer la France et la Finlande, alors il est préférable de dissocier le charbon de la tourbe¹⁰, cette dernière représentant une part non négligeable du mix énergétique finlandais (6%). Sans cela,

⁹ NERA (2002), CEC (1998), Stirling (1994) et (1996).

¹⁰ Ces deux énergies sont le plus souvent regroupées dans une même catégorie.

l'indicateur de diversité pénalisera le résultat de la Finlande en tronquant la variété de son mix énergétique.

Cet exemple souligne le problème de la mesure de la dissemblance entre les sources d'énergie. Si le plus souvent la tourbe et le charbon sont regroupés dans une même catégorie, c'est que l'on croit que relativement à un grand nombre de critères ces énergies réalisent des performances similaires (c'est le cas des critères environnementaux comme l'émission de carbone). Cependant, au regard d'autres critères tels que la sécurité de l'approvisionnement ou la raréfaction des ressources, on pourrait tout aussi bien envisager que tourbe et charbon sont dissemblables.

A.2.2 Les mesures de la diversité (les indicateurs)

Il existe deux méthodes principales pour évaluer la diversité d'un système ou d'un portefeuille d'options énergétiques. La première consiste en l'utilisation de techniques sophistiquées, comme l'analyse Monte-Carlo ou la théorie de portefeuille financier. Ici, l'idée centrale est la gestion optimale des risques pouvant compromettre la sécurité de l'approvisionnement. Ces risques concernent la volatilité des coûts ou des profits, risques que l'on peut appréhender par les probabilités. Ainsi l'on peut dériver des ensembles efficients de portefeuilles énergétiques, offrant un compromis entre les coûts attendus et la volatilité.

Plusieurs auteurs ont remis en cause l'utilisation de telles méthodes dans l'évaluation de la diversité.¹¹ Selon eux, l'insécurité de l'approvisionnement est caractérisée par ce que Frank Knight appelle l'incertitude « non-mesurable » ou « stricte ». Elle se distingue de l'incertitude « mesurable » en ce que la nature même des contingences possibles est inconnue. Autrement dit, c'est une situation d'ignorance ou de connaissance incomplète où toutes les surprises sont possibles. Dans ce cas, on ne devrait pas avoir recours au calcul probabiliste.

¹¹ Skea (2010), Stirling (2010) et IEA (2007).

L'autre méthode d'appréhension de la diversité est non-paramétrique. Elle ne nécessite *a priori* aucune connaissance au sujet des coûts ou de la volatilité. Il s'agit de calcul d'indicateurs quantitatifs¹² dont la grande majorité a été conçue en biologie et en écologie ; d'autres disciplines telles que l'économie et les sciences de l'information en ont permis d'amples développements.¹³

A.2.2.1 La théorie de la gestion de portefeuille appliquée à la diversité

On peut envisager un portefeuille constitué sur la base de différentes énergies primaires, qui sont plus ou moins disparates (énergies fossiles, énergies renouvelables, énergie hydraulique, énergie nucléaire). Les choix d'investissement des producteurs dans telle ou telle technologie sont étroitement associés au risque, c'est-à-dire l'incertitude qui pèse sur les flux monétaires d'un investissement.

Evaluer le risque d'un actif revient à estimer la variabilité du rendement espéré de cet actif (la variance ou l'écart type). Evaluer le risque d'un portefeuille d'actifs consiste à estimer la variabilité du rendement espéré de l'ensemble des actifs composant ce portefeuille (les variances de ces actifs), ainsi que la dépendance entre les actifs (la covariance). Lorsque les actifs du portefeuille sont non corrélés (très disparates), la covariance s'annule ; si on considère par simplification que toutes les variances sont égales et les actifs détenus dans les mêmes proportions, la formule permettant de calculer le risque est simplifiée ; elle est égale au ratio variance/nombre d'actifs. On observe donc dans ce cas que plus le nombre d'actifs augmente, c'est-à-dire plus le portefeuille se diversifie, plus le risque de portefeuille tend vers 0. En posant un nombre d'actifs égal à l'infini, on élimine le risque. Plus le coefficient de corrélation entre les rendements des actifs est faible et plus les bénéfices de la diversification sont importants. Un coefficient de corrélation égal à 1 annule le bénéfice de la diversification, le risque de portefeuille étant égal à la moyenne des risques des actifs composant le portefeuille ; un coefficient égal à -1 rend maximal le bénéfice de la diversification. Dans ce cas, on peut constituer un portefeuille sans risque de deux actifs risqués.

¹² Grubb *et al.* (2006), Jansen *et al.* (2005).

¹³ Stirling (1998) et (2007).

Mesurer l'effet de la diversification sur le risque est un moyen d'estimer l'impact de cette diversité sur la sécurité d'approvisionnement, puisqu'on mesure la stabilité et l'ampleur du rendement espéré de l'investissement de diversification, qui sont les éléments déterminants du choix d'investissement des producteurs. Roques et al. (2005) montrent que les bénéfices de la diversification peuvent être remis en cause par certaines « défaillances de marché » : les bénéfices sur le plan national d'un investissement nucléaire qui augmenterait la diversité des technologies de production apparaissent comme une « externalité » qui a une valeur très faible pour un électricien sur un marché où les prix de l'électricité sont fortement corrélés avec ceux du gaz et du carbone. La corrélation entre les prix de l'électricité et le coût du combustible de la technologie dominante introduit un biais dans les choix d'investissement en faveur de la technologie dominante. Un tel biais peut justifier l'intervention du régulateur (notamment public) pour encourager la diversité des technologies de production sur les marchés électriques. Les auteurs envisagent plusieurs solutions : une planification centralisée des choix technologiques « à la française » ; une intervention davantage tournée vers le marché comme dans d'autres pays européens ou aux Etats-Unis, telle des taxes et subventions différenciées par technologie ; une « obligation de diversité » dans les achats aux producteurs, imposées aux fournisseurs.

A.2.2.2 Les indicateurs de diversité

Deux indicateurs sont habituellement utilisés pour mesurer la diversité. Le premier et le plus connu est l'indice de Shannon-Wiener, parfois simplement appelé indice de Shannon, dont la formulation est la suivante :

$$H = - \sum_i p_i \ln p_i$$

Où p_i représente la part de l'énergie i dans le mix énergétique d'un pays ou bien la part de marché du fournisseur i .¹⁴ Ici, plus grande est la valeur de H et plus diversifié est le mix énergétique. Notons que cet indicateur augmente de façon monotone avec la variété et l'équilibre entre les différents éléments. Nous verrons par la suite que le principal reproche

¹⁴ La diversité énergétique peut concerner les types d'énergie utilisés ou bien le nombre de fournisseurs.

qui est fait à l'indice de Shannon est la non prise en compte de la disparité ou dissemblance entre les éléments.

La seconde mesure traditionnellement employée pour mesurer la diversité est l'indicateur de Simpson, aussi appelé indice de Herfindahl-Hirschman (HHI) :

$$D = \sum_i^N p_i^2$$

On peut par ailleurs montrer que les indices de Simpson et Shannon sont des cas spéciaux de la famille d'indices de la forme suivante :

$$\sum_i^N p_i^n$$

Il n'y a en réalité aucune raison théorique de choisir D plutôt que H . En général, les arguments avancés en faveur de l'indice de Simpson concernent le fait que cet indice reflète davantage la similarité que la diversité.

Jansen *et al.* (2004), sur la base de l'indice de Shannon, intègrent de manière séquentielle et additive d'autres dimensions déterminantes pour la sécurité de l'approvisionnement :

- La diversité des fournisseurs (importations) I_2
- La stabilité politique dans les régions exportatrices I_3
- La raréfaction des ressources naturelles I_2

Les indicateurs présentés sont alors des indicateurs composites, agrégeant plusieurs dimensions.

Ici, l'indice de base est appelé I_1 et il correspond à celui de Shannon que nous avons précédemment appelé H , soit

$$I_1 = - \sum_i p_i \ln p_i$$

La valeur maximale de I_1 est de 2,079¹⁵, sa valeur minimale est 0, cas où toute la production d'énergie se concentre sur une seule source d'énergie primaire. Ainsi, une valeur faible de I_1 indique une situation défavorable en termes de diversité énergétique par rapport à une valeur élevée de cet indicateur.

Pour prendre en compte la dépendance vis-à-vis des exportations, on intègre à I_1 un facteur correctif appelé c_{2i} , compris entre 0 et 1. On obtient alors la formule suivante :

$$I_2 = - \sum_i c_{2i} p_i \ln p_i$$

Une valeur faible de c_{2i} traduit pour la région concernée une dépendance élevée vis-à-vis des importations d'énergie, révélant un faible degré de diversité. Formellement,

$$c_{2i} = 1 - m_i \left[1 - \frac{S_i^m}{S_i^{m \max}} \right]$$

m_i est la part des importations nettes dans la fourniture de la source d'énergie i . S_i^m représente l'indice de Shannon des flux d'importations de l'énergie i :

$$S_i^m = - \sum_j m_{ij} \ln m_{ij}$$

¹⁵ Les auteurs considèrent 8 catégories de sources d'énergies primaires : le charbon, le pétrole, le gaz, les biocarburants récents, les biocarburants traditionnels, le nucléaire, les ressources renouvelables et l'hydroélectricité. La valeur maximale de 2,079 est calculée à partir de l'indice : $-\ln 1/M$ avec $M = 8$.

où m_{ij} est la part des importations d'énergie i provenant de la région j dans le montant total des importations d'énergie i ¹⁶.

On peut encore raffiner notre indice de diversité en intégrant, outre la dépendance aux importations, le mode de transport de l'énergie (par exemple, dans le cas du gaz, un pipeline ou un tanker de GNL), ce qui multiplie théoriquement par deux le nombre de régions considérées N (de 16 à 32). Selon les auteurs, en pratique, ce raffinement n'apparaît pas déterminant puisqu'à long terme, on considère que les pays de l'OCDE importeront leurs sources d'énergie des régions productrices selon des modes de transport hybrides. Mais dans une perspective de court et moyen terme, cette composante peut s'avérer intéressante.

A partir de I_2 , les auteurs proposent d'appréhender une autre dimension importante de la sécurité de l'approvisionnement : la stabilité politique à long-terme dans les régions exportatrices. Pour mesurer cette dernière, Jansen *et al.* (2004) suggèrent l'utilisation de l'indicateur de développement humain (IDH), en partie parce qu'il est publié régulièrement pour chaque pays et qu'il est très connu.

La formule de I_3 , indicateur prenant à la fois en compte la dépendance aux importations et la stabilité politique des pays fournisseurs, est la suivante

$$I_3 = - \sum_i c_{2i} p_i \ln p_i$$

Le facteur de correction c_{2i} est à présent défini par l'expression :

$$c_{2i} = 1 - m_i \left[1 - \frac{S_i^{m^*}}{S_i^{m^* \max}} \right]$$

¹⁶ La valeur maximale de S_i^m ($S_i^{m, \max}$) est égale à 2,77, les auteurs considérant 16 régions productrices, $(-\ln 1/N)$ avec $N = 16$, qui n'inclut pas la région pour laquelle on est en train de calculer l'indice).

Où S_i^{m*} est à présent l'indice de Shannon des flux d'importation corrigé du facteur de stabilité politique dans les différentes régions exportatrices, soit :

$$S_i^{m*} = - \sum_j h_j m_{ij} \ln m_{ij}$$

Par rapport à S_i^m , le nouvel élément est ici h_j , mesuré par l'IDH. Cet élément varie entre 0 (région très instable) et 1 (région très stable).

Enfin, Jansen *et al.* (2004) intègre une dernière dimension au problème de la diversité en tenant compte de la raréfaction des ressources.

A.2.3 Intérêts de la diversité

La diversité est le plus souvent présentée comme une propriété nécessaire lorsque le choix d'une technologie (ou d'une stratégie) est soumis à un environnement en mutation, dont on ne peut connaître en avance tous les types d'impacts possibles ainsi que leur dimension. Pour Rumsfeld (2002), la diversification est « ce que l'on peut faire de mieux lorsqu'on ignore ce que l'on ne sait pas ». C'est ce que Frank Knight appelle l'incertitude « non-mesurable ». Elle se distingue de l'incertitude « mesurable » en ce que la nature même des contingences possibles est inconnue. Autrement dit, c'est une situation d'ignorance où toutes les surprises sont possibles. Dans ce cas, la recherche d'une plus grande diversité comme moyen « d'éviter de mettre tous ses œufs dans le même panier » s'impose comme meilleur choix possible.

Au-delà de l'évitement de l'incertitude, la diversité du mix énergétique est une propriété reconnue par les gouvernements et l'industrie comme moyen stratégique permettant :

- d'augmenter la *sécurité énergétique* (notion définie comme la disponibilité d'une source régulière d'énergie à un prix abordable, IEA, 2001) ;
- de renforcer la *résilience* (donner définition) du système énergétique ;

- de contourner les problèmes liés à l'incertitude et à l'ignorance (risques) ;
- d'encourager l'innovation ;
- de mitiger le « lock-in » technologique ;
- d'augmenter l'acceptabilité sociale.

La diversification du bouquet énergétique est intéressante par les avantages macroéconomiques qui en découlent. La diversification est censée répondre quasi exclusivement au risque d'accroissement des prix du pétrole, qui représente un coût important pour la collectivité (en termes d'inflation, de chômage et de dévaluation des actifs financiers). Ces coûts ont été mis en lumière par un certain nombre de travaux. Les estimations de Greene et Tishchishyna (2000) sur la période 1970-2000 montrent que les fluctuations des prix du pétrole ont représenté un coût global de 7 000 milliards de dollars aux Etats-Unis (dont 43% représentent la diminution de PIB, 31% l'existence de transferts et 26% les ajustements macroéconomiques). Awerbuch et Sauter (2005) indiquent que la relation pétrole-PIB est statistiquement mesurable depuis la fin des années 1940. Pourtant, même si cette relation est davantage étudiée depuis 20 ans, les décideurs n'ont curieusement montré qu'un faible intérêt à cette question. La récente hausse spectaculaire des prix du pétrole augmente l'intérêt porté à cette relation.

Dans Stirling (1994), l'auteur analyse la force de l'argument de diversité très souvent utilisé par le gouvernement anglais pour approuver une dépendance accrue à l'option nucléaire dans le système anglais d'approvisionnement énergétique. Il montre que l'option « renouvelables » apporterait les mêmes avantages de diversité avec un niveau sensiblement plus faible de la « prime de diversité », et ce en dépit d'une méthode de classement traditionnelle (où les énergies renouvelables sont considérées comme bien plus hétérogènes que le nucléaire) et d'hypothèses de coûts en faveur du nucléaire.

A.3. Les limites de la notion de diversité

Plusieurs critiques viennent mitiger la portée de la notion de diversité, en particulier lorsqu'elle est appliquée à l'analyse des portefeuilles énergétiques. On peut en citer 3 majeures.

A.3.1. Diversité versus efficience

Par définition, la diversification délibérée d'un système a pour conséquence immédiate de rendre prioritaires des options qui sont peu performantes, voire inefficientes. En d'autres termes, il existe un certain compromis entre coûts de transaction et diversité (Williamson (1993)). Par ailleurs, une recherche de davantage de diversité implique une certaine réduction des avantages liés à la spécialisation, comme la standardisation ou les économies d'échelle.

Cette vision, qui est celle de l'approche économique traditionnelle, doit néanmoins être relativisée (Van den Bergh (2008)). Elle néglige en effet les bénéfices de la diversité quant aux améliorations du système lui-même à travers les innovations « recombiantes » et les « spillovers », cette dernière entraînant une contribution de long-terme à l'efficience économique.

A.3.2. Le prétexte de la diversité

Le recours systématique à la diversité dans les débats concernant la politique à suivre peut n'être qu'un prétexte. Elle est parfois invoquée comme l'unique qualité d'un système afin de favoriser une option particulière que, en réalité, on cherche à mettre en avant pour une tout autre raison que la diversité (Stirling (2007)).

A.3.3 Diversité et sécurité de l'approvisionnement

La diversité est le plus souvent utilisée en économie de l'énergie comme une propriété fondamentale de la sécurité de l'approvisionnement (IEA (1985), (1989), (2007); NERA (2002); PMSU (2002)). Or, comme le note Stirling (2010), la sécurité énergétique est davantage que la simple diversité. Elle est basée sur l'idée qu'une offre ininterrompue d'énergie est cruciale au bon fonctionnement d'une économie. La sécurité énergétique se définit en général comme la disponibilité d'une offre régulière d'énergie à un prix abordable (IEA, 2001). Cet objectif de sécurité d'approvisionnement peut être réalisé par différentes stratégies, parmi lesquelles la diversité. Par exemple, le recours aux ressources d'énergies nationales (IEA, 1980) ou bien à l'efficacité des marchés (Helm (2002)) sont deux stratégies valorisées comme permettant d'atteindre des niveaux optimaux de sécurité énergétique. Malgré cela, la recherche d'une plus grande diversité du mix énergétique reste une priorité de la plupart des Etats.

Mais la diversité ne se limite pas à la seule sécurité de l'approvisionnement. Elle est avant tout une propriété cruciale pour tout système soumis à de fortes incertitudes, comme c'est le cas des systèmes énergétiques. Elle permet de se prémunir naturellement contre le risque en évitant simplement de « mettre tous ses œufs dans le même panier » (Brooks (1986)).

A.3.4. Les problèmes relatifs à l'application de la notion de diversité

Lorsqu'on essaie de mesurer la diversité d'un système énergétique, plusieurs questions d'ordre conceptuel apparaissent.¹⁷ La première et la plus évidente concerne quel aspect exactement du système doit être diversifié et dans quelle mesure. S'agit-il du mix énergétique du pays lui-même ou celui d'un secteur en particulier comme la production électrique ou les transports ? Par ailleurs, la diversité concerne-t-elle le mix des pays fournisseurs d'un certain type de combustible (gaz, pétrole, charbon) ou bien les types de

¹⁷ Cf. IEA (2007), Annexe I.

technologies adoptés pour la production (de l'électricité, par exemple) ou encore les deux ?¹⁸

Par ailleurs, nous avons vu que si la diversité était composée de la variété, de l'équilibre et de la dissemblance entre les différentes options envisagées, il restait à définir formellement leurs relations et éventuellement la dépendance entre elles. Doit-on fixer une priorité entre variété et équilibre ou entre équilibre et dissemblance ? Pourquoi une propriété serait plus importante que les autres ? S'agirait-il d'une priorité liée à l'objet de l'étude lui-même, qui serait dépendante du contexte de l'analyse ?

Stirling (2010) offre certaines réponses à la question des priorités entre les trois propriétés de la diversité.

A.3.5. La nouvelle méthodologie d'évaluation de la diversité proposée par Stirling

Stirling (2010) propose une nouvelle méthode d'analyse de la *diversité* du mix énergétique, basée sur la notion de dissemblance ou de disparité.

La dissemblance est la propriété de la diversité qui pose le plus de problème lorsqu'on cherche à l'évaluer. C'est pourquoi elle est le plus souvent ignorée dans le calcul des divers indicateurs relatifs à la diversité. En effet, la dissemblance peut être appréhendée selon un grand nombre de critères extrêmement divers, comme :

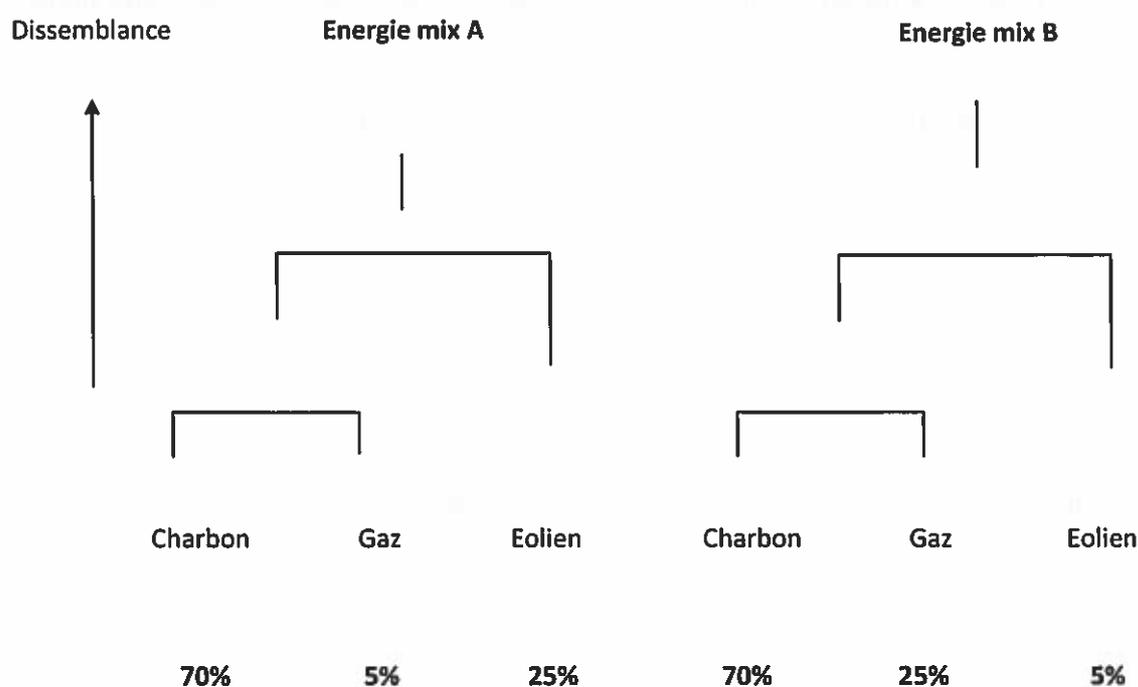
- Les impacts sur la santé et l'environnement
- Les coûts de production attendus
- La sécurité d'approvisionnement
- L'épuisement des ressources

Selon les experts et les institutions, le poids attaché à chacune de ces caractéristiques peut profondément varier. La disparité est par conséquent une notion subjective. La

¹⁸ Remarquons que le plus souvent l'analyse de la diversité énergétique a été circonscrite aux technologies produisant de l'électricité (NERA (2002), CEC (1998) et Stirling (1994)).

problématique qui se pose alors à l'évaluateur concerne l'accommodation des diverses opinions relatives à la dissemblance. Une solution, proposée par Stirling (2008), est le recours à l'analyse multicritère. Nous utiliserons dans ce qui suit un des résultats généraux de cette étude pour calculer un indicateur de diversité intégrant la disparité.

Les indicateurs que nous avons présentés dans ce qui précède concentrent leur attention sur la variété et l'équilibre des options en supposant implicitement qu'elles sont dissemblables de manière égale. Cependant, cette restriction de l'analyse peut avoir des effets pervers lorsque les options sont à égalité en termes de variété et d'équilibre. Stirling (2010) propose un exemple qui permet d'illustrer clairement ce problème.



Ici, il est question de comparer les mix énergétiques A et B. Le premier élément notable est que tous deux sont composés de 3 options énergétiques (gaz, charbon, éolien) dans des proportions égales, mais inversées concernant le gaz et l'éolien. Si l'on considère que les trois options sont identiques, les critères tenant compte seulement de la variété et de l'équilibre donnent un indice identique pour A et B.

Par contre, une analyse rapide de la dissemblance tenant compte des facteurs environnementaux indiquera que l'éolien est plus dissemblable du charbon et du gaz que ne le sont le gaz et le charbon entre eux. Dans ce cas, le mix A est plus divers que le B.

Le calcul de la diversité intégrant la disparité (noter S^d) est réalisé à travers la formule proposée par Stirling (1998). Cette formule reprend en partie la structure de l'indice de Shannon-Wiener. Elle est présentée ci-dessous.

$$S^d = \sum_{i,j} \alpha_{ij} p_i p_j$$

Où d_{ij} représente la distance entre les options i et j , p_i part respective de cette option

dans le mix énergétique, avec $0 \leq p_i \leq 1$ et $\sum_i p_i = 1$. Notons P le vecteur suivant :

$$P = \begin{pmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_N \end{pmatrix}$$

Par ailleurs, appelons D la matrice des coefficients de disparité d_{ij} :

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & \dots & d_{1N} \\ \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{N1} & \dots & \alpha_{NN} \end{pmatrix}$$

Par conséquent le calcul de notre indice de diversité avec disparité S^d prendra la forme du calcul matriciel suivant :

$$P^T D P$$

Concernant l'origine des distances entre les différentes options, nous nous sommes basés sur différents travaux et l'une des idées qui reçoit le plus d'attention concerne le taux d'apprentissage technologique. En effet, ce qui différencie une énergie d'une autre peut être caractérisé par les technologies qu'elle nécessite pour sa production et son transport par exemple, pour ne citer que ces deux aspects. Mais dans un contexte comme celui que l'on connaît actuellement, où les acteurs doivent s'orienter vers de nouvelles formes d'énergie, c'est le changement technologique qui prédomine et ce changement est en partie guidé par le coût des nouvelles technologies. Or, ce coût peut être minoré, avec le temps, par l'apprentissage technologique. Aussi, afin de caractériser la disparité entre les énergies, nous utiliserons les taux d'apprentissage technologique relatifs aux énergies renouvelables seulement. Ces taux, présentés par l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) dans son rapport Energy Technology Perspectives (2008), sont déterminés par divers experts technologiques.

Le tableau des distances entre les différentes énergies est utilisé dans l'analyse multicritère qui fait l'objet de la seconde partie du rapport (cf. la section B.2.1).

B. ANALYSE MULTICRITERE DE LA VULNERABILITE ENERGETIQUE

Cette deuxième partie du rapport présente une analyse multicritère de la vulnérabilité énergétique appliquée aux pays de l'Europe des 27, aux BRICs et aux Etats-Unis. La méthode retenue est la méthode ELECTRE TRI, pour différentes raisons que nous exposerons un peu plus loin. Elle utilise certains indicateurs présentés en première partie.

Nous présentons dans un premier temps quelques rappels sur la méthodologie, puis nous appliquons cette méthode aux différents pays.

B.1. Méthodologie utilisée : l'analyse multicritère

B.1.1. Intérêt de l'analyse multicritère

Née dans les années 1960, l'analyse multicritère est une méthode d'évaluation permettant d'orienter le choix d'un décideur, en comparant entre elles des alternatives (projets, mesures, actions ou stratégies), sur la base de plusieurs critères communs. A partir de l'ensemble des alternatives, l'analyse multicritère va successivement bâtir une liste de critères, auxquels sont affectés des poids et sur la base desquels seront comparées les alternatives, un tableau de performance des alternatives par critère, une agrégation des résultats visant à ordonner les alternatives par préférence.

En tant qu'aide à la décision, l'analyse multicritère présente plusieurs intérêts :

- c'est une méthode permettant de traiter de problématiques présentant des natures de critères très différentes, et pour lesquelles certains critères sont difficilement monétarisables ;

- c'est une méthode qui permet aux acteurs/décideurs/experts d'exprimer leur point de vue sur l'importance relative à accorder à chaque critère ;
- cette méthode permet de choisir le mode de traitement de la problématique envisagée en fonction de ce que souhaite obtenir le décideur : soit le choix de la meilleure alternative ou des alternatives les plus satisfaisantes, soit l'affectation des alternatives dans des catégories prédéfinies (par exemple, bonnes/moyennes/mauvaises), soit le classement des alternatives de la meilleure à la moins bonne.

Les critères correspondent aux conséquences ou impacts des alternatives. Ils doivent être suffisamment nombreux, précis, et de nature différente (économiques, sociaux, environnementaux, techniques). Les poids affectés à chaque critère dépendent de l'importance relative accordée aux différents impacts, en fonction de leur nature. Ainsi, la problématique du décideur peut être de retenir les alternatives qui génèrent le moins d'impacts possibles sur l'environnement, comme elle peut être d'accorder plutôt un poids relatif prépondérant au critère de coût. Chaque alternative est définie par un profil de notes : s'il y a par exemple 6 critères retenus, chaque alternative est évaluée relativement à sa performance sur chaque critère.

Cette analyse est souvent utilisée dans un cadre prospectif ; c'est alors un outil de négociation et de planification, servant à l'élaboration des choix stratégiques d'intervention. L'analyse multicritère est également utilisée dans un cadre rétrospectif. Elle contribue alors à évaluer une stratégie, un programme ou une politique à partir d'un bilan de ses effets. L'application de l'analyse ex post pour l'évaluation des stratégies de pays aux intérêts très divergents peut s'avérer très fructueuse.

Dans tous les cas, pour mener à bien une analyse multicritère, il est nécessaire de pouvoir identifier parfaitement les différentes alternatives, les logiques d'intervention, de sélectionner un nombre limité de critères, d'accorder un soin particulier au poids accordé à chacun de ces critères et de pouvoir évaluer aussi finement que possible la notation des performances des alternatives par critère. Ce travail préalable conditionne la qualité de l'évaluation qui sera produite.

B.1.2. L'approche opérationnelle retenue : l'agrégation partielle

L'analyse multicritère repose sur un état de l'information à un instant donné, que l'on va chercher à modéliser. Cette information modélisée n'est pas nécessairement exhaustive, dans le sens où les préférences du décideur ne peuvent être en général qu'imparfaitement formalisées. Toutefois, suffisamment bien explicitée, elle peut être exploitée et faire progresser le processus décisionnel.

La classification des méthodes présentes dans la littérature consiste à les distinguer selon la façon dont les performances des alternatives seront agrégées. Parmi les différentes méthodes, deux grandes familles se distinguent et sont largement utilisées : les méthodes d'agrégation complète et les méthodes d'agrégation partielle.

Les méthodes d'agrégation complète (*top-down approach*) sont également appelées méthodes d'agrégation classique ou méthodes par fonction d'utilité¹⁹. Leur principe repose sur la définition et la maximisation d'une fonction permettant d'agréger les n critères en un critère unique de synthèse. Ce type de méthodes revient à « agréger puis comparer ». Ceci permet donc de calculer une valeur pour chaque alternative et de retenir l'alternative qui obtient le meilleur score.

Trois principales difficultés sont opposées traditionnellement à cette méthode : (1) le fait de ne pas considérer que les alternatives puissent être incomparables (ces méthodes considèrent uniquement la préférence stricte ou l'indifférence/égalité entre les alternatives); (2) le fait que les critères de jugement soient nécessairement commensurables, ce qui n'est pas toujours le cas ; (3) enfin et surtout, le fait de présenter un fort effet compensatoire (synthétiser le problème en une fonction unique masque l'existence de critères discriminants ; une mauvaise note sur un critère peut toujours être compensée par une bonne note sur un autre critère).

¹⁹ La moyenne pondérée, l'UTA pour Utilité Additives (Jacquet-Lagrèze et Siskos, 1982), la Goal Programming, l'AHP pour Analytic Hierarchy Process (Saaty, 1977) et la MAUT pour Multi Attribute Utility Theory (Keeney *et al.*, 1976) font partie de cette catégorie, également les méthodes SMART et TOPSIS. La différence principale entre les différentes méthodes réside dans la manière de définir la fonction d'utilité.

Les méthodes d'agrégation partielle (*bottom-up approach*), ou méthodes de surclassement, d'inspiration française par rapport aux précédentes, d'inspiration américaine, sont dites « comparer puis agréger ». En effet, elles construisent des relations de comparaison des alternatives prises deux à deux ; ces comparaisons par couple permettent de définir un pré-ordre partiel sur la base du principe suivant : pour qu'une alternative 1 surclasse une alternative 2, il faut que l'alternative 1 soit meilleure sur une majorité de critères et que sur aucun critère, l'alternative 1 soit beaucoup plus mauvaise que l'alternative 2. Une fois définis les poids respectifs des critères, les seuils et règles à partir desquels il est possible de dire si une action est meilleure ou moins bonne qu'une autre, un ensemble de relations de surclassement par critère sont définies, puis agrégées pour obtenir un classement final.

Notre choix de retenir l'agrégation partielle tient à plusieurs raisons. Les approches d'agrégation complète visent comme souligné plus haut à classer de manière ordinale les alternatives ou faire le choix d'une alternative (lié à la propriété de transitivité). Dans la mesure où ce n'est pas l'objectif qui est retenu dans notre comparaison des stratégies, nous privilégions l'agrégation partielle. En effet, la volonté en comparant les stratégies énergétiques des pays n'est pas de les classer du « meilleur » au « moins bon », ni de définir le pays qui obtient le « meilleur score » mais plutôt de déterminer des groupes de pays caractérisés par des stratégies plus ou moins vulnérables. Par ailleurs, comparer des stratégies de pays peut amener à ce qu'elles soient incomparables.

L'intérêt de l'agrégation partielle réside donc en synthèse par le fait d'accepter les situations d'incomparabilité et de prendre en compte l'intransitivité.

Son inconvénient tient à ce qu'elle nécessite des analyses de sensibilité et de robustesse plus longues, car elles ne porteront pas seulement sur le poids affecté aux critères mais sur les seuils définis sur les critères, comme nous le verrons un peu plus loin. C'est un inconvénient qui peut être aisément surmonté, en choisissant divers scénarios de poids et de seuils, en fonction des avis exprimés par les experts sollicités pour les poids, en choisissant un nombre suffisamment grand de variations pour les seuils.

B.1.3. Le choix de la méthode ELECTRE TRI : principes de la méthode et arguments en faveur du choix de cette méthode

ELECTRE TRI²⁰ est une méthode d'agrégation partielle permettant de traiter des problématiques dites d'affectation (par rapport à celles de sélection ou de classement). En effet, le problème est posé en termes d'attribution de chaque alternative à une catégorie ou classe prédéfinie.

Dans notre cas d'étude, les alternatives sont les pays ; il s'agit d'affecter des pays dans 4 catégories selon le caractère plus ou moins vulnérable de leur stratégie d'approvisionnement : « très peu vulnérable », « peu vulnérable », « assez vulnérable », « vulnérable ».

Dans la mesure où ce n'est pas le classement des pays entre eux qui nous intéresse mais l'affectation à une catégorie prédéfinie, la méthode ELECTRE TRI prévoit que chaque alternative est comparée non pas successivement à chacune des autres alternatives mais successivement à chacune des bornes séparant chaque catégorie (profil de référence). Ce qui est comparé à ces bornes sont les notes de l'alternative sur les différents critères ; pour chaque critère, on mesure l'écart entre la performance de l'alternative et la borne entre 2 catégories, ce qui permet de constater des relations de surclassement : l'alternative considérée est au moins aussi bonne que la borne séparant les 2 catégories. Constater ainsi ces relations de surclassement permet d'affecter les alternatives aux catégories.

Comme dans les autres méthodes Electre, la procédure d'affectation repose sur le calcul de différents indices (de concordance et de discordance) qui aboutissent au calcul de l'indice de crédibilité, calculé pour chaque alternative. Cet indice indique si l'hypothèse de surclassement définie pour l'alternative est plausible ou non. Nous ne détaillons pas ici le calcul des indices de concordance par critère, de concordance global et de discordance qui permettent de calculer l'indice de crédibilité. Certaines références peuvent être consultées pour cela, notamment Maystre, Pictet et Simos (1994) et Moura (2008).

²⁰ Méthode proposée par Yu (1992)

Deux procédures d'affectation sont réalisées dans le cadre d'ELECTRE TRI, appelées « optimiste » et « pessimiste ». Elles permettent de déceler l'incomparabilité²¹. Si les deux procédures affectent l'alternative à la même catégorie, elle est parfaitement comparable avec la borne, donc la relation de surclassement est en quelque sorte « validée » ; sinon, elle s'avère plus ou moins incomparable (le « plus ou moins » dépendant de l'écart entre les deux catégories auxquelles elle est attribuée). C'est un des attributs de la méthode ELECTRE TRI : tout en synthétisant l'information, elle permet de conserver des informations utiles à travers la notion d'incomparabilité : dans le résultat final, certaines alternatives ont un profil multicritère contrasté par rapport à d'autres dont le profil est plus « plat ».

La procédure pessimiste consiste à « pousser » les alternatives dans les catégories les plus basses ; il s'agit en effet d'affecter l'alternative de haut en bas, c'est-à-dire de telle façon que cette alternative surclasse la borne basse de cette catégorie. La procédure optimiste consiste à l'inverse à pousser les alternatives dans les catégories les plus hautes, en procédant de bas en haut, c'est-à-dire en affectant l'alternative à une catégorie de telle façon que ce soit la borne haute de cette catégorie qui soit préférée à l'alternative.

Au terme de ces procédures d'affectation, les pays sont affectés dans les 4 catégories, avec pour certains une incertitude sur la catégorie à laquelle ils appartiennent.

Une analyse de sensibilité est menée, afin de constater comment la modification de certaines variables intervenant dans le processus d'affectation modifie le résultat final ; dans ELECTRE TRI, on fait varier prioritairement les poids affectés aux critères et les bornes entre 2 catégories.

B.2. Application de l'analyse multicritère

Les scénarios envisagés dépendent d'une part des critères utilisés pour définir la vulnérabilité. En effet, sur certains critères, seules les données de certains pays sont disponibles. D'autre part, certains critères ont été largement discutés dans la littérature (cf.

²¹ Cf. Maystre, Pictet, Simos (1994)

partie A du rapport sur la diversité) et il est intéressant de retenir cette multiplicité d'approches dans l'analyse.

B.2.1. Critères de mesure de la vulnérabilité

La diversité

Cette notion a été particulièrement développée dans la partie A du rapport. Il y est apparu que la diversité pouvait être mesurée à partir de plusieurs indicateurs : selon que l'on retient la diversité des sources d'approvisionnement, que l'on y ajoute celle des fournisseurs d'énergie (cf. les apports de Shannon-Wiener), ou que l'on retient la dissemblance entre les sources d'énergie (Stirling). Seulement 2 types de diversité sont utilisés dans l'analyse multicritère pour définir les différents scénarios qui seront calculés : la diversité des sources puis la diversité tenant compte de la dissemblance entre les énergies. Concernant la diversité des fournisseurs (indicateur agrégé I_3), nous ne la retenons, étant donné la difficulté de retenir des indicateurs agrégés dans l'analyse multicritère.

Concernant l'indice I_1 de SW, il est calculé à partir des données de l'AIE 2009²² sur la base des énergies suivantes :

- *Coal and coal products* (charbon)
- *Peat* (tourbe)
- *Crude, NGL, refinery feedstocks, oil products* (pétrole et produits pétroliers)
- *Natural gas* (gaz naturel)
- *Nuclear* (nucléaire)
- *Hydroelectricity* (hydroélectricité)
- *Geothermal* (géothermie)

²² Cf. « Energy statistics of OECD countries », IEA (2011 édition), pour une définition des différentes énergies utilisées dans le calcul des indicateurs

- *Solar, wind and others* (solaire, éolien et autres énergies renouvelables)

- *Biofuels and waste* (biocarburants et déchets)

Pour le calcul de I_1 , les données sont disponibles pour 27 pays européens et les BRICs.

L'indice de disparité de Stirling est calculé sur la base d'une matrice de dissemblance permettant d'estimer la « distance » qui sépare les différentes énergies :

	Charbon	Pétrole	Gaz nat	Nucl	Hydro	Géoth	Sol/éol	Biocarb
Charbon	0	0,5	0,5	0,25	1	1	1	0
Pétrole	0,5	0	0	0,5	1	1	1	0,5
Gaz nat	0,5	0	0	0,5	1	1	1	0,5
Nucl	0,25	0,5	0,5	0	1	1	1	0,25
Hydro	1	1	1	1	0	0,5	0	1
Géoth	1	1	1	1	0,5	0	0,5	1
Sol/éol	1	1	1	1	0	0,5	0	1
Biocarb	0	0,5	0,5	0,25	1	1	1	0

Le parti a été pris de ne pas dissocier le solaire de l'éolien bien que la distance entre les deux énergies ne soit pas nulle. La principale raison est que dans les données disponibles, elles sont souvent regroupées et leur part dans l'approvisionnement est relativement marginale par rapport aux autres énergies. L'éolien est plus largement représenté dans cet approvisionnement par rapport au solaire.

Comme pour le scénario avec l'indice I_1 de SW, les données sont disponibles pour 27 pays européens et les BRICs.

La dépendance énergétique

Le taux de dépendance énergétique est calculé (source AIE 2009) en faisant le rapport entre les importations nettes et la consommation brute d'énergies primaires. Ce taux peut être calculé pour chacun des grands types d'énergies ou toutes énergies confondues.

Il est calculé dans notre cas toutes énergies confondues, même si cela peut masquer la réalité des dépendances énergétiques les plus fortes sur certains secteurs, par exemple dans le secteur des transports.

La prise en compte de cet indicateur s'impose notamment dans le contexte européen où la dépendance énergétique pourrait atteindre près de 70% de la consommation totale d'énergie d'ici 2020, selon les estimations de la Commission européenne. Le niveau de dépendance évoluera nécessairement avec l'évolution des prix du pétrole ; si ce prix devait grimper à des niveaux très élevés, les pays seraient incités à se tourner vers des énergies alternatives et à réduire d'autant leur dépendance.

Un indice de raréfaction des ressources

La raréfaction des ressources concerne les énergies fossiles, et le ratio le plus fréquemment utilisé dans la littérature est le ratio R/P tenant compte des réserves prouvées.

Selon les données BP 2009, le ratio est de 122 ans pour le charbon, 42 ans pour le pétrole et 60 ans pour le gaz naturel, données que nous retenons dans l'étude.

Ce ratio est appliqué aux parts respectives des trois énergies fossiles concernées dans l'approvisionnement énergétique afin d'aboutir à un indice de raréfaction des ressources. Il est calculé pour 27 pays européens et pour les BRICs.

Les émissions atmosphériques

Les émissions atmosphériques sont de plusieurs natures : les polluants de basse couche qui ont un effet direct sur la santé (par exemple, l'ozone ou le NO₂) et les gaz à effet de serre qui participent au changement climatique en modifiant le bilan radiatif terrestre. Nous ne retenons que les gaz à effet de serre, en se concentrant sur une logique de long terme et parce que le protocole de Kyoto, prévoyant la baisse des GES, a fondé la volonté européenne de réduire de 8% les émissions de GES entre 1990 et 2012. Parmi les gaz à effet de serre, il y en a qui sont d'origine naturelle (par exemple, la vapeur d'eau H₂O ou le méthane CH₄), d'autres d'origine anthropique, tel que le CO₂ qui représente environ 70% des GES d'origine anthropique et qui est essentiellement issu de la combustion des énergies fossiles. Ces arguments expliquent le choix qui est fait de ne retenir que les émissions de CO₂ pour donner la mesure de l'impact environnemental. Le ratio retenu est le niveau d'émissions de CO₂ rapporté à la consommation totale d'énergie primaire (source AIE 2009).

L'intensité énergétique

L'intensité énergétique est un indicateur permettant d'évaluer la « sobriété énergétique » du pays, en calculant la quantité d'énergie consommée pour un même niveau de production de biens et services. L'importance de sa valeur dépend de facteurs climatiques et de facteurs structurels tels que la place de l'industrie lourde dans l'économie. On peut calculer une intensité énergétique primaire ou finale, qui est le rapport de la consommation primaire ou finale d'énergie au produit intérieur brut (calculé à parité de pouvoir d'achat qui tient compte des différences de niveau de vie).

Nous retenons comme critère dans notre analyse l'intensité énergétique primaire (source AIE 2009).

Il ne s'agit donc pas d'une mesure de l'efficacité énergétique, qui serait intéressante pour comparer des pays à structures économiques voisines. Dans ce cas, l'intérêt est de mesurer l'efficacité avec laquelle l'énergie est produite et consommée. On peut citer sur ce point le projet ODYSSEE-MURE de la Commission européenne et de l'ADEME qui identifie les facteurs déterminant l'intensité énergétique d'un pays, en sépare les effets pour définir un indicateur d'efficacité énergétique pour comparer les pays de l'UE15²³.

Dans notre cas, quelle qu'en soit la raison, qui peut être liée à des facteurs climatiques ou des facteurs économiques structurels, le fait qu'un pays soit vulnérable tient essentiellement au fait qu'il soit fortement consommateur d'énergie. Améliorer l'efficacité énergétique ne supprime pas le handicap que représente une forte consommation liée au contexte économique ou climatique d'un pays.

²³ Cf. sur ce point Global Chance (2009) qui présente les résultats de l'étude. Cette étude calcule une intensité énergétique finale ajustée, corrigée des variations et des différences de climat, des différences de structures économiques et de celles de l'industrie. On obtient ainsi un indicateur plus précis de l'efficacité énergétique au niveau de la demande. Le calcul pour les pays de l'UE15 montre qu'en 2006, c'est le Royaume Uni qui est de loin le plus performant avec une intensité énergétique finale ajustée 27 % inférieure à celle de l'Allemagne et 32 % à celle de la France. L'Espagne, la Belgique et le Portugal affichent les performances les plus médiocres. Les performances des nouveaux pays membres de l'UE (les NEM) sont du même ordre que celles des pays de UE-15, hormis la Bulgarie dont l'intensité ajustée est très élevée. La même étude calcule également l'indice ODEX, calculé en intégrant les corrections liées aux variations climatiques, aux évolutions structurelles de l'industrie ou de l'économie, à la taille des logements, etc., mais également calculé pour chaque secteur et sous-secteur de la demande d'énergie finale en fonction de grandeurs physiques représentatives de l'activité de chacun (par exemple, les tonnes de production d'acier pour la sidérurgie ou les tonnes.km pour le transport des marchandises). Ce travail permet d'isoler les évolutions qui sont réellement dues à l'efficacité énergétique. Tous ces indicateurs sont ensuite agrégés (pondération par les consommations d'énergie finale respectives) en un seul indice d'efficacité énergétique.

La consommation par tête

La consommation par tête peut comme l'indicateur précédent être calculée à partir de la consommation primaire ou finale, rapportée à la population totale du pays. Nous retenons dans notre analyse la consommation d'énergie primaire par habitant (source AIE 2009).

Le coût

Le critère de coût est mesuré par un indice de prix de l'électricité HT (source Eurostat 2011). Il est utilisé dans l'étude seulement pour les pays européens où, en l'absence de prix subventionnés, les prix sont censés refléter les coûts (ce qui n'est pas le cas pour les pays en développement et pour les BRICs).

Un indice de risque lié à l'accidentologie

Le risque correspond dans notre cas d'étude au risque lié aux accidents survenus dans le secteur énergétique (que l'origine soit technologique ou naturelle). Trois critères entrent dans le calcul de l'indice de risque :

- la gravité de l'impact : évaluée en fonction de la nature de l'impact (impact sur la flore, la faune, les vies humaines), l'étendue géographique de l'impact et la durabilité de l'impact (ou résilience) selon que l'impact est plus ou moins irréversible ;
- l'occurrence de l'impact : relatif au nombre d'accidents survenus avec conséquences humaines ;
- la détectabilité de l'origine de l'accident avant impact (probabilité de détecter le défaut, liée notamment aux normes de sécurité associées à l'exploitation).

Une échelle de valeur (de 1 à 5) permet de calibrer l'importance de l'impact au sein de chaque critère et une note est attribuée à chaque énergie sur chaque critère selon cette échelle de valeur, comme le montre les tableaux suivants.

Tableaux d'évaluation du risque d'accident par type d'énergie*

GRAVITE DE L'IMPACT				
NATURE DE L'IMPACT				
1	2	3	4	5
Aucun	Flore	Faune	Vies humaines	Vies humaines
Aucun impact sur la flore, la faune et les vies humaines	Impact sur la flore	Impact sur la flore et la faune	Impact sur la flore, la faune et moins de 100 morts par accident en 30 ans	Impact sur la flore, la faune et plus de 100 morts par accident en 30 ans
<i>Solaire, éolien, biomasse</i>			<i>Gaz naturel, charbon, nucléaire</i>	<i>Pétrole, hydroélectricité</i>
ETENDUE DE L'IMPACT				
1	2	3	4	5
Sur site	Autour	Local	Régional	National/International
Impact sur le lieu de l'accident	Impact à moins d'un km de l'accident	Impact à moins de 50km de l'accident	Impact à moins de 300km de l'accident	Impact à l'échelle nationale ou internationale
<i>Charbon, solaire, éolien, biomasse</i>	<i>Gaz naturel</i>		<i>Pétrole, hydroélectricité</i>	<i>Nucléaire</i>
RESILIENCE DE L'IMPACT SUR LE MILIEU				
1	2	3	4	5
Immédiat	Faible	Moyen	Durable	Irréversible
Impact seulement au moment de l'incident	Impact jusqu'à 1 mois après l'accident	Impact jusqu'à 5 ans après l'accident	Impact à l'échelle d'une génération	Impact sans limite dans le temps
<i>Charbon, solaire, éolien, biomasse</i>	<i>Gaz naturel</i>	<i>Pétrole, hydroélectricité</i>		<i>Nucléaire</i>

OCCURRENCE DE L'IMPACT				
1	2	3	4	5
Jamais	Très rare	Rare	Fréquent	Très fréquent
Aucun accident avec impact	Moins de 20 accidents en 30 ans	Entre 20 et 200 accidents en 30 ans	Entre 200 et 500 accidents en 30 ans	Plus de 500 accidents en 30 ans
<i>Solaire, éolien, biomasse</i>	<i>Nucléaire, hydroélectricité</i>	<i>Gaz naturel</i>		<i>Pétrole, charbon</i>

DETECTABILITE DE L'ACCIDENT				
1	2	3	4	5
Très forte	Forte	Moyenne	Faible	Non détectabilité
<i>Solaire, éolien, biomasse, nucléaire</i>	<i>Gaz naturel</i>	<i>Hydroélectricité</i>	<i>Charbon, pétrole</i>	

* à partir des données issues du Swiss Paul Scherrer Institute (PSI) qui a analysé les accidents majeurs survenus dans le secteur de l'énergie sur la période 1969-2000 dans les pays de l'OCDE et hors OCDE

L'indice qui est ensuite calculé tient compte des parts respectives d'énergie dans l'approvisionnement, appliquées au niveau de risque défini pour chaque énergie dans les tableaux qui précèdent.

B.2.2. Pondération des critères

La pondération permet d'attribuer un poids plus ou moins important à certains critères. Il existe plusieurs méthodes de pondération²⁴. On peut citer la méthode des entropies, méthode dite « objective » qui part de l'hypothèse que plus les évaluations (notes) d'un critère pour les différentes alternatives sont dispersées, plus le critère a de chance d'être décisif dans le processus de classement ; le poids d'un critère sera donc d'autant plus important que la dispersion des évaluations des alternatives sera importante. On peut également citer les méthodes de pondération directes, comme le classement simple avec l'aide d'experts ou de décideurs, et les méthodes de pondération indirectes, comme la méthode AHP.

La méthode retenue est un classement simple avec l'aide d'experts qui proposent une pondération. L'analyse de sensibilité permet par la suite de modifier la pondération, en privilégiant d'autres pondérations que celles retenues par les experts.

Les arguments issus des discussions d'experts et qui ont motivés la pondération relative des facteurs sont les suivants. En termes de sécurité d'approvisionnement énergétique, la disponibilité physique des ressources est traditionnellement définie comme l'aspect le plus déterminant, par rapport à des notions de coût, de facteurs environnementaux ou d'accidentologie. Ainsi, les critères de diversité et de dépendance aux importations qui sont directement liés à la question de l'approvisionnement ont un poids plus important dans l'analyse. Indirectement lié à la disponibilité des ressources, il y a la question de la demande ; plus cette demande est élevée, plus la question de l'approvisionnement se pose, ce qui place les critères d'intensité énergétique et de consommation par tête avec une

²⁴ Cf. notamment le détail des méthodes de pondération dans la thèse de doctorat de P. Moura « Méthode d'évaluation des performances des systèmes d'infiltration des eaux de ruissellement en milieu urbain », 2008, INSA de Lyon

pondération relativement élevée. Les critères relatifs aux émissions atmosphériques et au risque d'accidentologie sont relativement moins pondérés, ainsi que le critère de raréfaction des ressources.

Au regard de ces éléments, la pondération se définit donc de la manière suivante :

- on considère que la somme des poids doit être égale à 100 et les critères sont pondérés les uns par rapport aux autres (en %) ;
- les critères de disponibilité physique sont environ 2 fois plus importants que les critères de demande, 3 fois plus importants que le critère de coût et 4 fois plus importants que les critères environnementaux, d'accidentologie et de raréfaction des ressources.

Le tableau suivant représente ces pondérations ainsi que les unités de mesure de chaque critère. Concernant les unités de mesure, pour certains critères, ce sont des indices qui ont été évalués à partir d'échelle de 1 à 5 (le risque lié à l'accidentologie) ou à partir de formules de calcul (les critères de diversité, de raréfaction des ressources) qui ne définissent pas d'unités de mesure proprement dite, seulement une échelle de valeur. La plupart des critères sont évalués numériquement, des données objectives ayant fondé le calcul (critères de dépendance aux importations, d'intensité énergétique, de consommation par tête, de coût), et les unités de mesure apparaissent clairement.

Tableau des pondérations par critère (en %)

Critère 1	Critère 2	Critère 3	Critère 4	Critère 5	Critère 6	Critère 7	Critère 8
Diversité des sources et/ou des fournisseurs	Dépendance aux importations	Emissions atmosphériques	Intensité énergétique	Consommation par tête	Coût	Risque d'accident	Raréfaction des ressources
	%	tCO ₂ /tep	tep/2000USD	tep/habitant	€HT		
24	26	6	12	13	8	6	5

Lorsque pour certaines simulations le nombre de critères sera réduit (dans le cas où on intègre les BRICs), il faudra ajuster les poids affectés aux différents critères pour que la somme soit toujours égale à 100.

B.2.3. Scénarios retenus

Comme indiqués précédemment, les scénarios sont définis en fonction des différents indices de diversité retenus dans la littérature d'une part, des données disponibles par pays sur les différents indicateurs d'autre part.

A titre d'exemple, l'indice I_1 de SW a pu être calculé pour tous les pays (les 27 pays de l'UE et les BRICS) contrairement à l'indice I_3 de SW (la provenance des sources d'énergie dans l'approvisionnement de certains pays européens et des BRICS n'est pas une donnée disponible de l'AIE). Le tableau suivant permet de récapituler les données disponibles et les scénarios envisagés.

Tableau des scénarios en fonction de la disponibilité des ressources et des critères retenus

SCENARIOS	CRITERES							
SCENARIO 1 : Europe (27 pays)	C1 (I_1)	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
SCENARIO 2 : Europe 27	C1 (Disp)	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
SCENARIO 3 : Europe 27 + BRICS	C1 (I_1)	C2	C3	C4	C5		C7	C8
SCENARIO 4 : Europe 27 + BRICS	C1 (Disp)	C2	C3	C4	C5		C7	C8

B.3. Résultats de l'analyse multicritère

B.3.1. Scénario 1 : Europe des 27 et critère I₁ de diversité des énergies primaires

Matrice des performances

Le système défini dans ce scénario se caractérise par 27 alternatives (27 pays) et 8 critères²⁵.

Les performances de chaque pays par critère sont représentées dans le tableau qui suit.

Le tableau présente également le sens de variation des critères :

- ↗ signifie que la performance du pays au regard du critère considéré est d'autant plus forte que sa valeur est élevée ; ce sens de variation dans ELECTRE TRI détermine le caractère croissant du critère ;
- ↘ signifie que la performance du pays au regard du critère considéré est d'autant plus faible que sa valeur est élevée ; ce sens de variation dans ELECTRE TRI détermine le caractère décroissant du critère.

²⁵ Les valeurs de Chypre et Malte sont exclues des différents calculs de moyennes, de seuils et de bornes dans ELECTRE TRI car ces deux pays présentent des profils très atypiques.

Tableau des performances des pays par critère pour le scénario 1

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	<i>Diversité des énergies I₁</i>	<i>Dépendance aux importations</i>	<i>Emissions de CO₂</i>	<i>Intensité énergétique</i>	<i>Consommation par tête</i>	<i>Coût</i>	<i>Risque d'accidentologie</i>	<i>Raréfaction des ressources</i>
Sens de variation du critère	↗	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↗
Allemagne	1,58	63,7	2,36	0,143	3,89	0,141	44	261
Autriche	1,52	66,3	2,00	0,123	3,79	0,144	45	339
Belgique	1,36	86,7	1,76	0,175	5,30	0,157	46	304
Bulgarie	1,52	46,1	2,41	0,230	2,30	0,069	39	331
Chypre	0,24	100	2,98	0,140	3,11	0,213	86	84
Danemark*	1,44	0	2,51	0,120	3,37	0,126	46	251
Espagne	1,46	87,5	2,24	0,122	2,75	0,160	51	245
Estonie	1,14	25,3	3,09	0,250	3,54	0,070	35	253
Finlande	1,77	55,3	1,66	0,224	6,21	0,108	37	542
France	1,41	52,4	1,38	0,153	3,97	0,099	37	518
Grèce	1,17	75,3	3,06	0,106	2,61	0,103	62	140
Hongrie	1,48	59,8	1,94	0,171	2,48	0,134	37	304
Irlande	1,28	92,1	2,75	0,107	3,21	0,158	58	163
Italie	1,29	85,8	2,36	0,110	2,74	0,142	50	175
Lettonie	1,36	64	1,60	0,160	1,87	0,096	35	437
Lituanie	1,42	49,8	1,48	0,180	2,51	0,100	34	473
Luxembourg	0,88	100	2,53	0,133	7,95	0,145	63	156
Malte	0,01	100	3,06	0,100	1,93	0,182	90	43
Pays-bas	1,18	44,9	2,25	0,156	4,73	0,130	47	124
Pologne	1,15	32,2	3,05	0,160	2,46	0,115	46	157
Portugal	1,43	85,7	2,21	0,130	2,27	0,102	54	265
République tchèque	1,47	27,1	2,62	0,201	4,00	0,123	39	274
Roumanie	1,63	19,2	2,28	0,170	1,60	0,085	37	292
Royaume Uni	1,37	28	2,37	0,116	3,18	0,137	43	183
Slovaquie	1,59	67,3	1,98	0,182	3,09	0,137	34	357
Slovénie	1,61	49,2	2,17	0,160	3,41	0,108	45	355
Suède	1,59	39,1	0,92	0,168	4,88	0,138	32	697
Moyenne	1,40	56,11	2,20	0,16	3,52	0,12	44	304

* Le Danemark est exportateur net, mais la valeur du critère est ramenée à 0, pour signifier que ce pays est non dépendant énergétiquement.

Valeurs des bornes séparant les catégories

Comme indiqué précédemment dans la section sur la méthodologie de l'analyse multicritère ELECTRE TRI, chaque alternative (pays) est comparée non pas successivement à chacune des autres alternatives mais successivement à chacune des bornes séparant les catégories où seront finalement affectées les alternatives (les bornes définissant ce qu'on appelle le profil de référence). Ce qui est comparé à ces bornes (ce profil de référence) sont les notes de l'alternative sur les différents critères ; pour chaque critère, on mesure l'écart entre la performance de l'alternative et la borne entre 2 catégories, ce qui permet de constater des relations de surclassement : l'alternative considérée est au moins aussi bonne que la borne séparant les 2 catégories.

Le système présenté comprend 4 catégories et 3 bornes séparant ces catégories :

- Catégorie 1 : le groupe des pays très peu vulnérables
- Catégorie 2 : le groupe des pays peu vulnérables
- Catégorie 3 : le groupe des pays assez vulnérables
- Catégorie 4 : le groupe des pays vulnérables

La borne b_1 correspond à la frontière entre les catégories 1 et 2, la borne b_2 , entre les catégories 2 et 3, la borne b_3 , entre les catégories 3 et 4.

Le choix est fait ici de déterminer les bornes de chaque critère en calculant les 3 quartiles des performances des alternatives sur le critère considéré, ce qui donne le tableau suivant.

Tableau des frontières (bornes) entre catégories définissant le profil de référence du scénario 1

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
b_1	1,52	39,10	1,94	0,123	2,51	0,102	36,82	354,55
b_2	1,43	55,30	2,25	0,160	3,21	0,126	43,57	274,18
b_3	1,29	75,30	2,51	0,175	3,97	0,141	46,98	182,66

Une répartition par quartile signifie que pour chaque critère, il y a 25% des pays au dessus d'une borne et 25% en dessous de cette borne.

Valeurs des seuils

La détermination des seuils (d'indifférence, noté q, de préférence forte, noté p, et de veto, noté v) est une étape de l'analyse multicritère. Les valeurs des seuils sont déterminés à partir des performances des alternatives (pays) et des bornes, généralement de façon arbitraire car il n'y a pas de méthode définie. L'analyse de sensibilité est ensuite réalisée pour juger de l'influence de la variation de ces paramètres sur les résultats de l'analyse multicritère.

Les seuils sont définis ici par rapport à la moyenne des performances sur chaque critère : 5% pour le seuil d'indifférence, 10% pour le seuil de préférence forte, 80% pour le seuil de veto, tel qu'indiqué dans le tableau ci-dessous.

Tableau des seuils d'indifférence, de préférence forte et de veto pour le scénario 1

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
<i>moyenne</i>	1,4	56,11	2,2	0,16	3,52	0,12	43,89	303,85
q	0,07	2,81	0,11	0,008	0,18	0,006	2,19	15,19
P	0,14	5,61	0,22	0,016	0,35	0,013	4,39	30,39
v	1,12	44,89	1,76	0,126	2,82	0,101	35,11	243,08

Cela signifie que, pour chaque critère :

- si la différence entre la performance du pays et la borne est inférieure à 5% de la moyenne des performances, le pays et la borne sont indifférents sur le critère considéré ;
- si la différence entre la performance du pays et la borne est comprise entre 5% et 10% de la moyenne des performances, le pays est faiblement préféré à la borne (si la performance du pays est plus élevée que la borne) ou la borne est faiblement préférée au pays (si c'est la borne qui est au-dessus) ;

- si la différence entre la performance du pays et la borne est comprise entre 10% et 80% de la moyenne des performances, le pays est fortement préféré à la borne (si la performance du pays est plus élevée que la borne) ou la borne est fortement préférée au pays (si c'est la borne qui est au-dessus) ;

- si la différence entre la performance du pays et la borne est supérieure à 80% de la moyenne des performances, dans le cas où c'est la performance du pays qui est moins élevée que la borne, elle ne pourra jamais surclasser la borne quel que soit le critère.

Sur ce dernier point qui concerne les seuils de veto, cela a pour conséquence que, dans la procédure pessimiste d'affectation à une catégorie, un pays ne peut être placé dans une catégorie si, pour au moins un critère, la comparaison est en faveur de la borne basse de cette catégorie avec un écart supérieur à la valeur du seuil de veto correspondant.

Le raisonnement s'applique à l'ensemble des critères.

Résultats

Tableau d'affectation des pays par catégorie pour le scénario 1 (simulation de base)

CATEGORIES	CLASSEMENT PESSIMISTE	CLASSEMENT OPTIMISTE
Pays très peu vulnérables	Roumanie	Danemark Estonie Finlande Pologne République tchèque Roumanie Royaume Uni Suède Malte
Pays peu vulnérables	Bulgarie Danemark France Hongrie Lituanie Royaume Uni Slovénie Suède	Allemagne Autriche Bulgarie Espagne France Grèce Hongrie Italie Lettonie Lituanie Pays-Bas Portugal Slovaquie Slovénie
Pays assez vulnérables	Allemagne Autriche Lettonie République tchèque Slovaquie	Irlande Chypre
Pays vulnérables	Belgique Chypre Espagne Estonie Finlande Grèce Irlande Italie Luxembourg Malte Pays-Bas Pologne Portugal	Belgique Luxembourg

ELECTRE TRI prévoit une double procédure d'affectation (optimiste, pessimiste) dont la robustesse dépend de ce que l'on appelle le « seuil de coupe λ ». λ définit le degré minimal de crédibilité lié au surclassement d'un profil de référence (les bornes) par le profil du pays, ou vice-versa. Il est généralement fixé au-delà de 0,5 (le plus souvent à 0,76 comme dans le logiciel ELECTRE TRI, qui est le choix fait dans l'analyse), et ce afin de s'assurer que le surclassement découle d'une « majorité pondérée » des critères. En d'autres termes, le seuil de coupe correspond au nombre minimum de critères qui doivent être favorables au surclassement.

La procédure pessimiste consiste à comparer, pour chaque critère, le pays à la borne en commençant par la borne b_3 . Si le pays surclasse la borne b_3 , le pays sera classé dans la catégorie 4 pour le critère considéré, et ainsi de suite en comparant successivement aux autres bornes.

Dans la procédure optimiste, la borne est comparée au pays, en commençant par la borne b_1 . Si la borne b_1 surclasse le pays, le pays est affecté dans la catégorie 1, et ainsi de suite.

Un pays qui se retrouve dans la même catégorie selon le classement pessimiste ou optimiste présente un profil plat, dans le sens où il n'y a pas de critères sur lesquels le pays a des performances très éloignées des performances moyennes de la catégorie considérée. C'est le cas par exemple de la Belgique, la Bulgarie, la France, la Hongrie, la Roumanie, ou la Slovaquie.

En revanche, un pays qui se retrouve dans 2 catégories très distinctes présente un profil de performance plus contrasté, comme la Finlande, les Pays-Bas ou le Portugal.

Au-delà des ces considérations, nous privilégions la procédure pessimiste. En effet, la procédure d'affectation pessimiste ne va affecter dans les bonnes catégories que les pays dont les performances sont solidement établies et rejettera dans les mauvaises catégories ceux qui présentent un doute. C'est une procédure plus exigeante, qui est souvent retenue si l'on veut rester prudent quant à la solidité d'une alternative.

En se centrant sur le classement pessimiste, on peut analyser les résultats en faisant quelques remarques.

Un pays, comme la Roumanie, qui est performant sur les deux critères les mieux pondérés, en l'occurrence la diversité énergétique et la dépendance aux importations, se situe nécessairement dans la catégorie la plus haute, celle des pays les moins vulnérables énergétiquement. Concernant ce pays, il est par ailleurs dans la moyenne ou meilleur sur une grande majorité de critères. A l'inverse, un pays comme l'Italie, l'Irlande, la Grèce ou l'Espagne qui sont très mauvais sur les deux critères les mieux pondérés se retrouvent dans la catégorie des pays les plus vulnérables. Dans le cas des Pays-Bas, la performance sur le critère de diversité est mauvaise, ainsi que sur les critères de demande qui sont relativement bien pondérés, ce qui est également le cas, mais dans une moindre mesure, pour la Finlande.

Il est important de préciser qu'ELECTRE TRI ne compare pas les pays entre eux mais bien par rapport à un profil de référence, et que ce sont les différentes variables du système qui vont amener à positionner un pays dans l'une ou l'autre des catégories.

L'analyse de sensibilité permet de modifier l'affectation des pays en modifiant plusieurs variables du système.

Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité est intéressante à trois niveaux :

- sur le seuil de coupe, l'affectation des pays aux catégories dépendant beaucoup du niveau du seuil de coupe ;
- sur les poids affectés aux critères, qui dépendent de la sensibilité des experts et de différentes considérations ;
- sur les bornes des 4 catégories d'affectation, qui en variant peuvent augmenter ou réduire le nombre de pays par catégorie.

Sensibilité des résultats à la variation du seuil de coupe

Un seuil de coupe qui augmente et passe par exemple de 0,76 à 0,91 signifie un nombre plus important de critères qui doivent être favorables au surclassement. Lorsque les critères sont

pondérés uniformément à 1, passer de 0,76 à 0,88 signifierait qu'il faudrait non plus 6 mais 7 critères favorables. Dans notre cas, les critères sont pondérés différemment, mais le principe reste le même : augmenter le seuil de coupe augmente la majorité pondérée des critères qui doivent être favorables au surclassement.

Plusieurs simulations sont réalisées, représentées dans le tableau qui suit, avec notées en rouge les modifications par rapport à la simulation de base.

Tableau de calcul de la sensibilité à la variation du seuil de coupe dans le scénario 1*

Seuil de coupe λ	Catégorie 1 <i>Très peu vulnér.</i>	Catégorie 2 <i>Peu vulnér.</i>	Catégorie 3 <i>Assez vulnér.</i>	Catégorie 4 <i>Vulnér.</i>
0,76 → 0,89		Danemark Roumanie Royaume Uni Slovénie	Allemagne Autriche France Hongrie Lettonie Lituanie Slovaquie	Belgique Bulgarie Chypre Espagne Estonie Finlande Grèce Irlande Italie Luxembourg Malte Pays-Bas Pologne Portugal Répub. Tchèque Suède
0,76 → 0,64	Roumanie	Bulgarie Danemark France Hongrie Lettonie Lituanie Pologne Portugal Répub. Tchèque Royaume Uni Slovénie Suède	Allemagne Autriche Finlande Grèce Italie Pays-Bas Slovaquie	Belgique Chypre Espagne Estonie Irlande Luxembourg Malte
0,76 → 0,51	Danemark Répub. Tchèque Roumanie	Allemagne Autriche Bulgarie France Hongrie Lettonie Lituanie Pays-Bas Pologne Portugal Royaume Uni Slovaquie Slovénie Suède	Belgique Espagne Estonie Finlande Grèce Italie	Chypre Irlande Luxembourg Malte

* Chaque simulation est comparée à la simulation de base

Le fait d'augmenter le seuil de coupe, et donc le nombre minimum de critères favorables au surclassement, tend à faire redescendre certains pays dans les catégories inférieures ; le nombre de pays dits vulnérables augmente. A l'inverse, réduire le nombre de critères favorables au surclassement amène logiquement à voir remonter les pays dans les catégories les moins vulnérables (la catégorie des vulnérables tend à se vider).

Sensibilité des résultats à la variation des bornes entre les catégories

Dans la simulation de base, on a placé les bornes selon les quartiles, impliquant que pour chaque critère chaque catégorie « contient » 25% des pays. Une première simulation peut consister à modifier les bornes b_1 et b_3 de telle sorte que les catégories inférieure et supérieure (catégories 1 et 4) soient réduites pour chaque critère : seulement 15% dans la catégorie 1 et 15% dans la catégorie 4 ; logiquement, cette manipulation augmente d'autant les catégories intermédiaires (catégories 2 et 3).

Une autre simulation peut consister au contraire à réduire les catégories intermédiaires et augmenter les catégories inférieure et supérieure, afin de constater si des pays remontent vers la catégorie 1 la moins vulnérable ou descendent vers la catégorie 4 la plus vulnérable. Dans ce cas, on place par exemple les bornes de telle manière que pour chaque critère 35% des pays soient au dessus de la borne b_1 et 35% en dessous de la borne b_3 .

Les résultats de ces 2 simulations sont donnés dans le tableau suivant.

Tableau de calcul de la sensibilité à la variation des bornes dans le scénario 1*

Bornes	Catégorie 1 <i>Très peu vulnér.</i>	Catégorie 2 <i>Peu vulnér.</i>	Catégorie 3 <i>Assez vulnér.</i>	Catégorie 4 <i>Vulnér.</i>
Catégorie 1 à 15% Catégorie 3 à 15%	Roumanie	Bulgarie Danemark France Hongrie Royaume Uni Slovénie Suède	Allemagne Autriche Belgique Espagne Estonie Grèce Italie Lettonie Pays-Bas Pologne Portugal Répub. Tchèque Slovaquie	Chypre Espagne Finlande Irlande Luxembourg Malte
Catégorie 1 à 35% Catégorie 3 à 35%	Bulgarie Lituanie Roumanie	Danemark France Hongrie Royaume Uni Slovénie Suède	Allemagne Autriche Lettonie Slovaquie	Belgique Chypre Espagne Estonie Finlande Grèce Italie Irlande Luxembourg Malte Pays-Bas Pologne Portugal Répub. Tchèque

*Chaque simulation est comparée à la simulation de base

Sensibilité des résultats à la variation des poids des critères

L'analyse de sensibilité porte également sur les poids affectés aux différents critères, dont la modification peut affecter considérablement les résultats de la simulation de base. Dans la simulation de base, on rappelle que la pondération a été réalisée de la manière suivante : les critères de disponibilité physique (diversité et dépendance aux importations) ont été pondérés 2 fois plus que les critères de demande (intensité énergétique, consommation par

tête), 3 fois plus que le critère de coût et 4 fois plus que les critères environnementaux, d'accidentologie et de raréfaction des ressources.

4 simulations de variations des poids des critères sont proposées ici :

- réduire le poids des critères de disponibilité physique (1,5 et non 2 fois plus importants que les critères de demande)
- augmenter le poids des critères de disponibilité physique (2,5 fois plus importants que les critères de demande, 3,5 fois plus importants que les critères de coût et 4,5 fois plus importants que les critères environnementaux, d'accidentologie et de raréfaction des ressources)
- augmenter le poids du critère coût (2 fois et non 3 fois plus important que les critères de disponibilité physique, c'est-à-dire autant que les critères de demande)
- augmenter le poids des facteurs environnementaux, d'accidentologie et de raréfaction des ressources (3 fois et non 4 fois plus importants que les critères de disponibilité physique, c'est-à-dire autant que le critère de coût)

Tableau des simulations de pondération des critères du scénario 1 (en %)

Critère 1	Critère 2	Critère 3	Critère 4	Critère 5	Critère 6	Critère 7	Critère 8
Diversité des sources et/ou des fournisseurs	Dépendance aux importations	Emissions polluantes	Intensité énergétique	Consommation par tête	Coût	Risque d'accident	Raréfaction des ressources
SIMULATION 1 : réduction du poids des critères de disponibilité physique							
21	23	7	13	14	9	7	6
SIMULATION 2 : augmentation du poids des critères de disponibilité physique							
27	29	5	11	12	7	5	4
SIMULATION 3 : augmentation du poids du critère de coût							
23	25	6	11	12	12	6	5
SIMULATION 4 : augmentation du poids des critères environnementaux							
22	24	8	11	12	8	8	7

Les résultats des simulations sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau de calcul de sensibilité à la variation du poids dans le scénario 1*

Poids des critères	Catégorie 1 <i>Très peu vulnér.</i>	Catégorie 2 <i>Peu vulnér.</i>	Catégorie 3 <i>Assez vulnér.</i>	Catégorie 4 <i>Vulnér.</i>
Simulation 1 Réduction du poids des critères de disponibilité physique		Bulgarie Danemark France Hongrie Lettonie Lituanie Roumanie Royaume Uni Slovénie Suède	Allemagne Autriche Répub. tchèque Slovaquie	Belgique Chypre Espagne Estonie Finlande Grèce Irlande Italie Luxembourg Malte Pays-Bas Pologne Portugal
Simulation 2 Augmentation du poids des critères de disponibilité physique	Roumanie	Bulgarie Danemark France Hongrie Lituanie Royaume Uni Slovénie Suède	Allemagne Autriche Finlande Lettonie Répub. tchèque Slovaquie	Belgique Chypre Espagne Estonie Grèce Irlande Italie Luxembourg Malte Pays-Bas Pologne Portugal
Simulation 3 Augmentation du poids du critère de coût	Roumanie	Bulgarie Danemark France Hongrie Lituanie Royaume Uni Slovénie Suède	Allemagne Autriche Finlande Lettonie Répub. tchèque Slovaquie	Belgique Chypre Espagne Estonie Grèce Irlande Italie Luxembourg Malte Pays-Bas Pologne Portugal
Simulation 4 Augmentation du poids des critères environnementaux		Bulgarie Danemark France Hongrie Lettonie Lituanie Roumanie Royaume Uni Slovénie Suède	Allemagne Autriche Finlande Répub. tchèque Slovaquie	Belgique Chypre Espagne Estonie Grèce Irlande Italie Luxembourg Malte Pays-Bas Pologne Portugal

* Chaque simulation est comparée à la simulation de base

Le cas de la Finlande est significatif de la situation d'un pays qui est handicapé dans l'affectation par un niveau de consommation par habitant presque deux fois supérieur à la moyenne des pays. Le fait de donner plus d'importance à certains critères pour lesquels la Finlande est dans la moyenne voire plus performante fait remonter ce pays dans une catégorie moins vulnérable.

B.3.2. Scénario 2 : Europe des 27 avec critère de disparité

Pour ce scénario, nous ne détaillons pas autant les différentes étapes décrites pour le scénario 1, le même mode de raisonnement étant valable pour tous les scénarios. Seule la matrice des performances par pays est présentée ici ainsi que les résultats, pour constater si le fait de retenir un autre indice de diversité modifie les résultats du scénario 1.

Le scénario retient comme indice de diversité l'indice de disparité de Stirling, qui tient compte du nombre et des proportions relatives d'énergies primaires dans l'approvisionnement, comme le fait l'indice de Shannon Wiener I_1 , mais intègre également la distance qui sépare les différentes énergies.

Les pondérations par critère sont les mêmes que celles retenues dans la simulation de base du scénario 1.

Matrice des performances

Comme le montre la matrice des performances suivante, par rapport au scénario 1, seul le premier critère est modifié.

Tableau des performances des pays par critère pour le scénario 2

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	<i>Disparité des énergies</i>	<i>Dépendance aux importations</i>	<i>Emissions de CO2</i>	<i>Intensité énergétique</i>	<i>Consommation par tête</i>	<i>Coût</i>	<i>Risque d'accidentologie</i>	<i>Raréfaction des ressources</i>
Sens de variation du critère	↗	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↗
Allemagne	0,29	63,7	2,36	0,143	3,89	0,141	44	261
Autriche	0,38	66,3	2,00	0,123	3,79	0,144	45	339
Belgique	0,23	86,7	1,76	0,175	5,30	0,157	46	304
Bulgarie	0,31	46,1	2,41	0,230	2,30	0,069	39	331
Chypre	0,07	100	2,98	0,140	3,11	0,213	86	84
Danemark	0,29	0	2,51	0,120	3,37	0,126	46	251
Espagne	0,27	87,5	2,24	0,122	2,75	0,160	51	245
Estonie	0,18	25,3	3,09	0,250	3,54	0,070	35	253
Finlande	0,33	55,3	1,66	0,224	6,21	0,108	37	542
France	0,3	52,4	1,38	0,153	3,97	0,099	37	518
Grèce	0,27	75,3	3,06	0,106	2,61	0,103	62	140
Hongrie	0,25	59,8	1,94	0,171	2,48	0,134	37	304
Irlande	0,15	92,1	2,75	0,107	3,21	0,158	58	163
Italie	0,22	85,8	2,36	0,110	2,74	0,142	50	175
Lettonie	0,33	64	1,60	0,160	1,87	0,096	35	437
Lituanie	0,28	49,8	1,48	0,180	2,51	0,100	34	473
Luxembourg	0,06	100	2,53	0,133	7,95	0,145	63	156
Malte	0,003	100	3,06	0,100	1,93	0,182	90	43
Pays-bas	0,14	44,9	2,25	0,156	4,73	0,130	47	124
Pologne	0,24	32,2	3,05	0,160	2,46	0,115	46	157
Portugal	0,3	85,7	2,21	0,130	2,27	0,102	54	265
République tchèque	0,28	27,1	2,62	0,201	4,00	0,123	39	274
Roumanie	0,32	19,2	2,28	0,170	1,60	0,085	37	292
Royaume Uni	0,22	28	2,37	0,116	3,18	0,137	43	183
Slovaquie	0,32	67,3	1,98	0,182	3,09	0,137	34	357
Slovénie	0,36	49,2	2,17	0,160	3,41	0,108	45	355
Suède	0,44	39,1	0,92	0,168	4,88	0,138	32	697
Moyenne	0,27	56,11	2,20	0,16	3,52	0,12	44	304

Valeurs des bornes séparant les catégories

Comme indiqué précédemment, dans ELECTRE TRI, chaque pays est comparé non pas successivement à chacun des autres pays mais à chacune des bornes séparant les catégories où seront finalement affectées les alternatives, c'est-à-dire à un profil de référence.

Tableau des frontières (bornes) entre catégories définissant le profil de référence du scénario 2

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
b₁	0,32	39,10	1,94	0,123	2,51	0,102	36,82	354,55
b₂	0,28	55,30	2,25	0,160	3,21	0,126	43,57	274,18
b₃	0,23	75,30	2,51	0,175	3,97	0,141	46,98	182,66

Valeurs des seuils

Comme précédemment, les seuils sont définis ici par rapport à la moyenne des performances sur chaque critère : 5% pour le seuil d'indifférence, 10% pour le seuil de préférence forte, 80% pour le seuil de veto, tel qu'indiqué dans le tableau ci-dessous.

Tableau des seuils d'indifférence, de préférence forte et de veto du scénario 2

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
<i>moyenne</i>	0,27	56,11	2,2	0,16	3,52	0,12	43,89	303,85
q	0,01	2,81	0,11	0,008	0,18	0,006	2,19	15,19
P	0,03	5,61	0,22	0,016	0,35	0,013	4,39	30,39
v	0,22	44,89	1,76	0,126	2,82	0,101	35,11	243,08

Résultats

Tableau d'affectation des pays par catégorie dans le scénario 2 (classement pessimiste)

Catégorie 1 <i>Très peu vulnér.</i>	Catégorie 2 <i>Peu vulnér.</i>	Catégorie 3 <i>Assez vulnér.</i>	Catégorie 4 <i>Vulnér.</i>
Roumanie	Bulgarie Danemark France Lituanie Slovénie Suède	Allemagne Autriche Grèce Hongrie Lettonie Pologne République tchèque Royaume Uni Slovaquie	Belgique Chypre Espagne Estonie Finlande Irlande Italie Luxembourg Malte

			Pays-Bas Portugal
--	--	--	----------------------

Comme dans les précédentes simulations, le résultat du scénario 2 est comparé à la simulation de base du scénario 1.

Le résultat du scénario 2 est sensiblement identique au scénario 1, sauf pour le Royaume Uni et la Hongrie qui redescendent dans la catégorie inférieure et la Grèce et la Pologne qui remontent dans la catégorie supérieure.

B.3.3. Scénario 3 : Europe des 27, BRICs et Etats-Unis avec critère de diversité I₁

Dans ce scénario, on ajoute les BRICs et les Etats-Unis aux pays de l'Europe des 27. Il y a désormais 7 critères à partir desquels on définit les relations de surclassement (absence du critère de coût).

Tableau des pondérations par critère (en %)

Critère 1	Critère 2	Critère 3	Critère 4	Critère 5	Critère 6	Critère 7
Diversité des sources et/ou des fournisseurs	Dépendance aux importations	Emissions polluantes	Intensité énergétique	Consommation par tête	Risque d'accident	Raréfaction des ressources
	%	tCO ₂ /tep	tep/2000USD	tep/habitant		
26	27	7	13	14	7	6

La pondération est définie de manière identique que pour la simulation de base du scénario 1 et le scénario 2 (par rapport aux critères de disponibilité physique, 2 fois moins pour les critères de demande, 4 fois moins pour les critères environnementaux, d'accidentologie et de raréfaction des ressources).

La matrice des performances est présentée dans le tableau qui suit.

Matrice des performances

Tableau des performances des pays par critère pour le scénario 3

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	<i>Diversité des énergies I₁</i>	<i>Dépendance aux importations</i>	<i>Emissions de CO₂</i>	<i>Intensité énergétique</i>	<i>Consommation par tête</i>	<i>Risque d'accidentologie</i>	<i>Raréfaction des ressources</i>
Sens de variation du critère	↗	↘	↘	↘	↘	↘	↗
Allemagne	1,58	63,7	2,36	0,143	3,89	44	261
Autriche	1,52	66,3	2,00	0,123	3,79	45	339
Belgique	1,36	86,7	1,76	0,175	5,30	46	304
Bulgarie	1,52	46,1	2,41	0,230	2,30	39	331
Chypre	0,24	100	2,98	0,140	3,11	86	84
Danemark*	1,44	0	2,51	0,120	3,37	46	251
Espagne	1,46	87,5	2,24	0,122	2,75	51	245
Estonie	1,14	25,3	3,09	0,250	3,54	35	253
Finlande	1,77	55,3	1,66	0,224	6,21	37	542
France	1,41	52,4	1,38	0,153	3,97	37	518
Grèce	1,17	75,3	3,06	0,106	2,61	62	140
Hongrie	1,48	59,8	1,94	0,171	2,48	37	304
Irlande	1,28	92,1	2,75	0,107	3,21	58	163
Italie	1,29	85,8	2,36	0,110	2,74	50	175
Lettonie	1,36	64	1,60	0,160	1,87	35	437
Lituanie	1,42	49,8	1,48	0,180	2,51	34	473
Luxembourg	0,88	100	2,53	0,133	7,95	63	156
Malte	0,01	100	3,06	0,100	1,93	90	43
Pays-bas	1,18	44,9	2,25	0,156	4,73	47	124
Pologne	1,15	32,2	3,05	0,160	2,46	46	157
Portugal	1,43	85,7	2,21	0,130	2,27	54	265
République tchèque	1,47	27,1	2,62	0,201	4,00	39	274
Roumanie	1,63	19,2	2,28	0,170	1,60	37	292
Royaume Uni	1,37	28	2,37	0,116	3,18	43	183
Slovaquie	1,59	67,3	1,98	0,182	3,09	34	357
Slovénie	1,61	49,2	2,17	0,160	3,41	45	355
Suède	1,59	39,1	0,92	0,168	4,88	32	697
Brésil	1,41	6,5	1,41	0,150	1,24	44	513
Russie*	1,26	0	2,37	0,420	4,56	36	158
Inde	1,35	26,9	2,35	0,150	0,59	39	335
Chine	1,05	12,2	3,03	0,190	1,70	42	217
Etats-Unis	1,50	25,8	2,40	0,190	7,03	48	216
Moyenne	1,39	49,14	2,22	0,168	3,44	44	301

* La Russie comme le Danemark est exportateur net, mais la valeur du critère est ramenée à 0, pour signifier que ce pays est non dépendant énergétiquement.

Valeurs des bornes séparant les catégories

Tableau des frontières (bornes) entre catégories définissant le profil de référence du scénario 3

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
b₁	1,51	26,95	1,95	0,131	2,47	36,85	350,64
b₂	1,42	49,50	2,32	0,160	3,20	43,29	269,59
b₃	1,28	67,05	2,49	0,182	3,99	46,83	191,07

Valeurs des seuils

Tableau des seuils d'indifférence, de préférence forte et de veto du scénario 3

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
<i>moyenne</i>	1,39	49,14	2,22	0,168	3,44	43,50	301,20
q	0,07	2,46	0,11	0,008	0,17	2,17	15,06
P	0,14	4,91	0,22	0,017	0,34	4,35	30,12
v	1,11	39,31	1,77	0,135	2,75	34,80	240,96

Résultats

Les résultats issus de l'ajout des BRICs et des Etats-Unis dans l'analyse, sur la base de la simulation de base du scénario 1, sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau d'affectation des pays par catégorie dans le scénario 3 (classement pessimiste)*

Catégorie 1 <i>Très peu vulnér.</i>	Catégorie 2 <i>Peu vulnér.</i>	Catégorie 3 <i>Assez vulnér.</i>	Catégorie 4 <i>Vulnér.</i>
	Brésil Bulgarie Danemark France Inde Lituanie Roumanie Royaume Uni Slovénie Suède	Allemagne Autriche Hongrie Lettonie République tchèque Slovaquie	Belgique Chine Chypre Espagne Estonie Etats-Unis Finlande Grèce Irlande Italie Luxembourg Malte Pays-Bas Pologne Portugal Russie

*Le résultat du scénario 3 est comparé à la simulation de base du scénario 1.

La position de la Russie et de la Chine s'expliquent par un faible niveau de diversification des sources d'énergie primaire, et des performances contrastées sur les différents critères. Le cas des Etats-Unis est lié à un niveau de consommation par tête plus de deux fois supérieur à la moyenne des pays et des performances contrastées sur les différents critères. Le Brésil, à l'inverse, présente des performances très satisfaisantes sur certains critères, dont le critère de dépendance, et se situe dans la moyenne pour les autres critères, sans performance médiocre sur aucun des critères.

B.3.4. Scénario 4 : Europe des 27, BRICs et Etats-Unis avec critère de disparité

Par rapport au scénario précédent, seul le critère de diversité est modifié, remplacé par l'indice de disparité.

Le tableau des pondérations de critères est identique à celui du scénario précédent.

La matrice des performances est présentée dans le tableau qui suit.

Matrice des performances

Tableau des performances des pays par critère pour le scénario 4

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	<i>Disparité des énergies</i>	<i>Dépendance aux importations</i>	<i>Emissions de CO₂</i>	<i>Intensité énergétique</i>	<i>Consommation par tête</i>	<i>Risque d'accidentologie</i>	<i>Raréfaction des ressources</i>
Sens de variation du critère	↗	↘	↘	↘	↘	↘	↗
Allemagne	0,29	63,7	2,36	0,143	3,89	44	261
Autriche	0,38	66,3	2,00	0,123	3,79	45	339
Belgique	0,23	86,7	1,76	0,175	5,30	46	304
Bulgarie	0,31	46,1	2,41	0,230	2,30	39	331
Chypre	0,07	100	2,98	0,140	3,11	86	84
Danemark*	0,29	0	2,51	0,120	3,37	46	251
Espagne	0,27	87,5	2,24	0,122	2,75	51	245
Estonie	0,18	25,3	3,09	0,250	3,54	35	253
Finlande	0,33	55,3	1,66	0,224	6,21	37	542
France	0,3	52,4	1,38	0,153	3,97	37	518
Grèce	0,27	75,3	3,06	0,106	2,61	62	140
Hongrie	0,25	59,8	1,94	0,171	2,48	37	304
Irlande	0,15	92,1	2,75	0,107	3,21	58	163
Italie	0,22	85,8	2,36	0,110	2,74	50	175
Lettonie	0,33	64	1,60	0,160	1,87	35	437
Lituanie	0,28	49,8	1,48	0,180	2,51	34	473
Luxembourg	0,06	100	2,53	0,133	7,95	63	156
Malte	0,003	100	3,06	0,100	1,93	90	43
Pays-bas	0,14	44,9	2,25	0,156	4,73	47	124
Pologne	0,24	32,2	3,05	0,160	2,46	46	157
Portugal	0,3	85,7	2,21	0,130	2,27	54	265
République tchèque	0,28	27,1	2,62	0,201	4,00	39	274
Roumanie	0,32	19,2	2,28	0,170	1,60	37	292
Royaume Uni	0,22	28	2,37	0,116	3,18	43	183
Slovaquie	0,32	67,3	1,98	0,182	3,09	34	357
Slovénie	0,36	49,2	2,17	0,160	3,41	45	355
Suède	0,44	39,1	0,92	0,168	4,88	32	697
Brésil	1,41	6,5	1,41	0,150	1,24	44	513
Russie*	1,26	0	2,37	0,420	4,56	36	158
Inde	1,35	26,9	2,35	0,150	0,59	39	335
Chine	1,05	12,2	3,03	0,190	1,70	42	217
Etats-Unis	1,50	25,8	2,40	0,190	7,03	48	216
Moyenne	0,27	49,14	2,22	0,168	3,44	44	301

Résultats

Tableau d'affectation des pays par catégorie dans le scénario 4 (classement pessimiste)*

Catégorie 1 <i>Très peu vulnér.</i>	Catégorie 2 <i>Peu vulnér.</i>	Catégorie 3 <i>Assez vulnér.</i>	Catégorie 4 <i>Vulnér.</i>
Brésil	Bulgarie Danemark France Lituanie Roumanie Slovénie Suède	Allemagne Autriche Chine Hongrie Inde Lettonie Pologne République tchèque Royaume Uni Slovaquie	Belgique Chypre Espagne Estonie Etats-Unis Finlande Grèce Irlande Italie Luxembourg Malte Pays-Bas Portugal Russie

*Le résultat du scénario 4 est comparé à la simulation de base du scénario 1.

L'affectation des BRICs et des Etats-Unis ne change pas fondamentalement par rapport à la simulation précédente, mise à part la position du Brésil qui est défini dans ce scénario comme le pays le moins vulnérable.

La méthode multicritère ELECTRE TRI a permis de proposer un certain « classement » des pays par catégories plus ou moins vulnérables énergétiquement. Comme nous l'avons décrit, le résultat dépend d'un certain nombre de critères et de variables soumis à discussion d'experts, qui peuvent être modifiés dans le cadre de l'analyse de sensibilité.

Il convient de préciser que nous avons modifié les poids des critères mais sans modifier l'ordre de priorité, nous rangeant derrière les experts, en privilégiant toujours les critères de disponibilité physique puis de demande puis de coût, et enfin liés à l'environnement, l'accidentologie et l'épuisement des ressources. L'analyse de sensibilité pourrait être

beaucoup plus tranchée mais cela ne présente pas d'intérêt majeur selon nous, et peut éloigner de la réalité.

La section qui suit propose une autre mesure de la vulnérabilité et propose également un classement des pays à partir de la notion de vulnérabilité systémique.

C. LA VULNERABILITE SYSTEMIQUE : DEFINITION ET MESURE

C.1. Littérature et définitions

La vulnérabilité systémique est un concept qui a été développé en écologie et par les sciences dites de la *soutenabilité*. Ce concept est le plus souvent utilisé dans l'analyse des conséquences issues des changements environnementaux (en particulier les changements climatiques) sur les systèmes socio-écologiques, comme par exemple les villes ou les communautés humaines quelles qu'elles soient. Dans ce domaine de recherche, la problématique concerne la capacité du système étudié à affronter les perturbations auxquelles il est soumis, comme les ouragans ou les inondations.

La vulnérabilité systémique est composée de trois éléments basiques : l'exposition, la sensibilité et l'adaptation. Plus précisément,

- l'exposition se réfère à la fréquence, au degré et à la durée des perturbations possibles ;
- la sensibilité mesure le degré auquel le système peut être modifié ou affecté par les chocs ;
- l'adaptation concerne la capacité du système à s'ajuster aux perturbations, à modérer les dommages potentiels, à profiter éventuellement des opportunités occasionnées, et enfin à endiguer les conséquences relatives aux transformations qui apparaissent.

L'exposition est souvent associée à la probabilité de survenance de l'évènement. Par exemple, deux systèmes écologiques distincts peuvent présenter différentes expositions s'ils sont soumis à différents climats. Par ailleurs, la sensibilité précise dans quelle mesure le système sera affecté par un facteur en particulier. Pour certains auteurs, comme Gallopin (2006), l'exposition est un attribut de la relation entre le système et la perturbation, plutôt que du système lui-même. Par conséquent, il doit être exclu en tant que composant de la vulnérabilité. Dans la présente analyse, il a été décidé de conserver l'exposition, ce qui signifie que la vulnérabilité sera une propriété de la relation entre le système et la perturbation elle-même.

Un système peut dans le même temps présenter une forte exposition et une faible sensibilité, s'il est fréquemment exposé à des perturbations mais résiste bien (il n'est pas affecté). La sensibilité et l'exposition sont positivement corrélées à la vulnérabilité, alors que l'adaptation est négativement corrélée, ce qui signifie que ce dernier composant atténue les impacts de l'exposition et de la sensibilité.

A partir des trois éléments que l'on vient de définir, on peut calculer un indicateur dont la forme est donnée ci-dessous.

$$\text{Vulnérabilité} = \text{Exposition} \times \frac{\text{Sensibilité}}{\text{Adaptation}}$$

Cette équation donne le niveau de vulnérabilité d'un système dont les éléments sont l'exposition, la sensibilité et l'adaptation. De la manière la plus simple qu'il soit, cette formalisation respecte la cohérence entre trois éléments telle qu'elle a été décrite plus haut. De plus, elle fournit une structure générale définissant les liens basiques entre un système et son environnement.²⁶

Afin de mieux percevoir comment la vulnérabilité systémique fonctionne, nous allons considérer un exemple emprunté à Gallopin (2006). Soit une population vivant dans une région bien définie et étant partitionnée en segments (suivant des critères tels que le niveau de revenu, la localisation ou l'âge). Chaque segment ainsi défini peut être vu comme un système. L'objectif est ici de mesurer et de comparer la vulnérabilité des différents segments aux impacts liés à la propagation d'une maladie infectieuse.

Si le système est basé sur l'âge par exemple, alors les enfants et les personnes âgées sont les segments ou systèmes qui peuvent présenter les symptômes les plus sérieux si infectés comparés aux autres. On dira que ces deux systèmes présentent une forte sensibilité. Cependant, la probabilité d'entrer en contact avec les germes, c'est-à-dire l'exposition, peut être plus faible pour les personnes âgées, relativement aux enfants, car ils peuvent avoir des relations sociales plus réduites. D'un autre côté, le segment « âge moyen » peut exhiber une forte exposition mais également une adaptation élevée, parce qu'ils ont une certaine

²⁶ Pour plus de détails, voir Gallopin (2006).

expérience des soins médicaux (par rapport aux enfants) et, comme la plupart sont des personnes actives, elles devraient réagir plus rapidement que les personnes âgées.

Définie par Luers (2005), la notion de *surface de vulnérabilité* se veut plus opérationnelle que la précédente. Elle permet notamment d'évaluer la vulnérabilité relative d'une population ou d'une localisation donnée. Cette notion est particulièrement adaptée lorsque l'évaluation concerne des régions ou des Etats.

La formule est la suivante :

$$\text{Vulnérabilité} = f \left[\frac{\text{Sensibilité, Exposition}}{\frac{\text{Etat}}{\text{Seuil}}} \right]$$

La surface est donc basée sur l'expression d'une fonction de la vulnérabilité, où cette dernière est proportionnelle à la sensibilité et l'exposition, mais inversement proportionnelle à l'état du système relativement au seuil du dommage.

La *sensibilité* et l'*exposition* sont ici des critères exogènes. Le premier se définit comme le degré à partir duquel un système répond à une perturbation extérieure. Il inclue la capacité à résister au changement ainsi que celle permettant de retourner à un état initial après que la tension ait été éliminée. L'exposition, elle, se définit comme les forces qui peuvent mettre le système en tension, telles que l'ampleur et la fréquence. Il est à noter qu'ici que *sensibilité* et *exposition* sont supposées être liées. En effet, lorsqu'on compare deux systèmes, l'effet relatif de l'exposition d'un système dépend des sensibilités relatives (en l'absence de sensibilité, il n'y a pas d'exposition). L'analyse de la vulnérabilité d'un système exige l'identification d'un seuil, ou d'un point de référence, à partir duquel le système est dit être endommagé. Ce seuil permet d'avoir une représentation relative des conditions du système.

Luers *et al.* (2005) proposent une expression mathématique de la vulnérabilité à partir d'une définition générale. L'objectif de ces auteurs est de rendre le concept opérationnel, c'est à dire quantifiable. Ils définissent tout d'abord un seuil de dommage et mesurent ensuite la *susceptibilité* comme la sensibilité et l'exposition du système aux « stressors ».

A titre d'illustration, ils considèrent un système d'interaction hommes /environnement où le bien-être (W) est une fonction parabolique d'une variable indépendante (X). Dans un premier temps, on peut ne s'intéresser qu'à la seule sensibilité du système à différents stressors (sans intégrer l'ampleur et la fréquence des perturbations, i.e., l'exposition) et identifier un seuil de bien-être à partir duquel le système est dit « endommagé ». On a la relation suivante :

$$V = f \left(\frac{\frac{\partial W}{\partial X}}{\frac{\partial W}{\partial Y}} \right)$$

où W_n représente une valeur seuil de bien-être.

Pour intégrer l'ampleur et la fréquence des perturbations (i.e., l'exposition du système), les auteurs calculent la valeur espérée du ratio de sensibilité défini au-dessus, en intégrant la fréquence de distribution d'un stressor d'intérêt :

$$V = \int \frac{\frac{\partial W}{\partial T}}{\frac{\partial W}{\partial Y}} P_T dT$$

où P_T est la probabilité d'occurrence du stressor T . Cette métrique de la vulnérabilité permet de distinguer deux systèmes caractérisés par différentes sensibilités et expositions.

Luers (2005) applique son concept de la vulnérabilité de surface au système agricole de la vallée Yaqui. C'est un système basé sur la culture du blé, où les rendements sont parmi les plus élevés au monde. Cependant, les modifications de l'environnement politique et

économique, combinés à de longues sécheresses et des changements climatiques, sont en train de rendre les agriculteurs plus sensibles aux questions du rendement durable.

L'objectif des auteurs est une évaluation de la vulnérabilité relative des rendements agricoles à la variabilité et au changement climatique, ainsi qu'aux fluctuations de marché entre les fermiers. L'unité de l'analyse (ou du système) est le champ agricole ainsi que les personnes responsables de la gestion de ce champs, la ferme-unité. Les questions auxquelles répond l'analyse sont :

- Quelles fermes ont les rendements les plus vulnérables à la variabilité et au changement climatique, ainsi qu'aux fluctuations de marché ?
- Quels facteurs contribuent au différentiel de vulnérabilité parmi les fermiers ?

Ici, la vulnérabilité des rendements du blé pour la région sont estimés par la relation définie précédemment, où V représente la vulnérabilité, Y les rendements de blé, T la température minimale moyenne et P_T la probabilité de T .

C.2. Transposer la vulnérabilité systémique au problème de la sécurité d'approvisionnement énergétique

Nous allons à présent appliquer la notion de vulnérabilité systémique à la problématique qui nous intéresse ici, à savoir la sécurité de l'approvisionnement énergétique des pays. Dans un premier temps, cela revient à relier les indicateurs caractérisant un système énergétique aux trois éléments de base de la vulnérabilité systémique, l'exposition, la sensibilité et l'adaptation.

Nous allons donc tout d'abord préciser ce qu'on entend par système énergétique. Un tel système sera ici appréhendé par le côté demande des ressources primaires d'énergie (PES)²⁷. Ceci n'est pas entièrement satisfaisant en raison du rôle important également joué par le côté offre du PES, comme le souligne Jansen and Seebregts (2010). Cependant, comme les approches traditionnelles tendent à se concentrer sur le côté demande du PES, nous

²⁷ Primary Energy Sources.

suivrons également cette démarche afin de préserver un certain degré de comparaison entre les analyses, mais aussi par convenance.

Afin de transposer la vulnérabilité systémique au problème de l'énergie, considérons tour à tour les trois éléments constitutifs de la vulnérabilité systémique.

C.2.1 L'exposition

Le niveau d'exposition d'un pays donné doit indiquer dans quelle mesure son mix énergétique est « exposé » à des perturbations probables. Cependant, définir une distribution de probabilité incluant toutes les perturbations que le système peut affronter est une tâche impossible.²⁸ L'exposition peut alors être approximée par des indicateurs révélant en quoi deux systèmes sont différemment exposés. Par rapport à la sécurité, un mix énergétique bien diversifié est en général vu comme un rempart face à l'incertitude.²⁹ Par conséquent, nous utiliserons ici des indices de diversité concernant les types d'énergie et de fournisseurs comme une mesure du degré d'exposition d'un pays. L'idée est simplement que plus un pays présente un mix énergétique diversifié, plus son degré d'exposition doit être faible.

La façon la plus pertinente de considérer à la fois la diversité des types d'énergie et des fournisseurs est de faire appel à l'indice de Shannon proposé par Jansen *et al.* (2004). Cet indice est noté I_2 et donc nous utiliserons son inverse comme mesure de l'exposition, c'est-à-dire, $1/I_2$.

Le tableau ci-dessous, issu de Vignolo (2012), donne les indicateurs d'exposition pour 18 pays européens.

²⁸ Cela reviendrait à anticiper au moins tous les futurs développements économiques et les innovations.

²⁹ « The essential quality of diversity lies simply in putting eggs in different baskets », Stirling (2010).

Table 1: Diversity and Exposure

Country	Diversity (I_2)	Exposure ($1/I_2$)
Germany	1,32	0,76
Denmark	1,25	0,80
Czech Republic	1,22	0,82
France	1,14	0,87
Portugal	1,08	0,93
Austria	1,07	0,93
Spain	1,05	0,95
Italy	0,98	1,02
Greece	0,95	1,05
United Kingdom	0,89	1,12
Hungary	0,89	1,12
Finland	0,85	1,17
Netherlands	0,75	1,34
Poland	0,73	1,38
Sweden	0,72	1,39
Ireland	0,63	1,58
Belgium	0,62	1,60
Luxembourg	0,52	1,94

Source: author's calculation

Dans ce tableau, les pays ont été classés du plus au moins exposé, et donc du moins au plus diversifié. Remarquons que le groupe des pays les moins exposés contient l'Allemagne, le Danemark, la République Chèque, et la France. Ces pays ont un indice d'exposition inférieur à 0,9. A côté de ce groupe, on peut définir le groupe des pays les plus exposés. Il s'agit de l'Irlande, la Belgique et le Luxembourg, avec un indice supérieur à 1,5. Soulignons aussi que les pays les moins exposés ne présentent pas un indice de Shannon-Wiener élevé, comme nous le montre le tableau 2 ci-dessous. C'est le cas en particulier de la France et du Danemark, qui ont des stratégies peu diversifiées en termes de ressources énergétiques (en raison de l'importance du nucléaire pour la France), mais qui par ailleurs atténue ce résultat grâce à la forte diversité de leurs fournisseurs. Nous verrons dans les prochaines sections comment ce résultat sera affecté par l'intégration de la sensibilité et de l'adaptation.

Table 2: Shannon-Wiener's diversity index

Country	(SW)
Finland	1,89
Austria	1,78
Germany	1,67
Sweden	1,66
Ireland	1,60
Czech Republic	1,57
Spain	1,56
Hungary	1,55
Portugal	1,49
Denmark	1,48
France	1,41
Italy	1,36
United Kingdom	1,36
Belgium	1,32
Netherlands	1,2
Poland	1,20
Greece	1,15
Luxembourg	1,08

Source: author's calculation

C.2.2 La sensibilité

La seconde composante de la vulnérabilité systémique est la sensibilité. Cette composante mesure le degré avec lequel le système peut être modifié ou affecté par les perturbations. Intuitivement, un système énergétique sera d'autant plus affecté que sa consommation est élevée. Considérons par exemple deux pays, l'un avec une consommation énergétique extrêmement faible et l'autre présentant au contraire une consommation élevée. Alors, une perturbation, quelle que soit sa nature, devrait affecter plus profondément le pays consommant beaucoup d'énergie.

Comme mesure de la sensibilité, la consommation d'énergie pourra être donnée par le TPES *per capita* ou bien par l'intensité énergétique, définie par TPES/GDP. Cependant, afin

d'éviter les effets dus à la taille de la population, nous choisirons d'utiliser l'intensité énergétique (EI). EI est communément employée pour obtenir des informations sur l'utilisation efficiente de l'énergie pour produire des biens et services. Le tableau ci-dessous, également emprunté à l'étude de Vignolo (2012), présente les EI pour 18 pays que nous avons choisis d'étudier.

Table 3: Sensibility as measured by Energy Intensity (toe/thousand 2000 USD)

Country	TPES/GDP	Country	TPES/GDP
Finland	0,2243	Germany	0,1426
Czech Republic	0,2008	Luxembourg	0,133
Belgium	0,1751	Austria	0,1232
Poland	0,1718	Spain	0,1217
Hungary	0,1705	Portugal	0,1213
Sweden	0,1676	Denmark	0,1196
Netherlands	0,1557	United Kingdom	0,1158
France	0,1528	Ireland	0,1069
Italy	0,15	Greece	0,1064

Source: IEA

C.2.3 L'adaptabilité

L'adaptabilité est l'élément central de notre transposition de la vulnérabilité systémique au domaine de l'énergie. Comme cela a été mentionné en introduction, cette composante joue un rôle crucial car elle vient atténuer l'importance de l'exposition et de la sensibilité.

L'adaptabilité a été définie comme la capacité du système à s'ajuster aux perturbations, à modérer les dommages potentiels et, si le cas se présente, à saisir les opportunités (comme l'abandon d'une source d'énergie au profit d'une autre dont le prix a diminué significativement).

Dans notre étude, l'adaptabilité d'un système énergétique sera caractérisée par les deux principaux contributeurs au changement technologique, à savoir :

- L'apprentissage (*Learning*)

- La recherche et développement, notée ici RD&D (*Research, Development and Demonstration*)

Même si le lien entre ces deux contributeurs et les performances du secteur énergétique sont parfois complexes, en particulier pour le RD&D, ils sont considérés comme de bons indicateurs de la capacité à induire une transition vers des formes plus efficaces de production et de consommation de l'énergie.

En se référant au guide édité par l'AIE, la RD&D en énergie inclut « recherche, développement et démonstration » reliés à la production, au stockage, au transport, à la distribution et aux utilisations rationnelles de toutes formes d'énergie. La démonstration recouvre « la conception, la construction d'un prototype d'une technologie à un stade quasi-commercialisable avec l'objectif de fournir aux financiers, aux industriels et aux décideurs politiques les informations techniques, économiques et environnementales ». Par conséquent, la RD&D en énergie exclut les efforts de déploiement, c'est-à-dire les programmes conçus pour contourner les barrières liées à l'introduction d'une nouvelle technologie sur le marché. Il doit être remarqué cependant que l'apprentissage contribue principalement au déploiement par l'intermédiaire de la réduction des coûts.

L'apprentissage représente l'expérience qui peut être obtenue lorsqu'on utilise une technologie particulière. Il est habituellement défini comme une fonction de l'expérience cumulée mesurée par la capacité installée (même si ce processus est parfois incertain). La capacité installée de l'extraction d'énergie, sa conversion, son transport, sa distribution et les technologies d'utilisation finales améliorent leur efficacité ou bien sont remplacées par de nouvelles. L'analyse empirique souligne ici le phénomène d'apprentissage technologique : plus une technologie particulière permet de gagner de l'expérience, plus grands sont les améliorations concernant la performance, les coûts et d'autres caractéristiques technologiques importantes.

Sagar et van der Zwaan (2006) notent que la R&D est nécessaire pour le changement technologique mais pas suffisante en elle-même pour apporter de nouvelles technologies au marché. À côté, les activités de déploiement peuvent représenter une aide précieuse, notamment par l'apprentissage. Par conséquent, dans le présent rapport, nous mesurerons l'adaptabilité en utilisant les budgets de RD&D par pays, pondérés par l'apprentissage. Cela

signifie donc qu'un pays peut réduire sa vulnérabilité énergétique en augmentant son adaptabilité à l'aide de la RD&D et l'apprentissage.

L'apprentissage technologique est approximé par l'intermédiaire des taux d'apprentissage estimés reportés par l'AIE et basés sur le jugement d'experts en technologies.

Le tableau ci-dessous présente ces taux d'apprentissage pour les technologies énergétiques.

Table 4: learning rates for energy technologies

Energy technology	Learning rate (%)
CO2 capture and storage	3
Solar heating and cooling	10
Photovoltaics	18
Solar thermal power	10
Wind energy	7
Biofuels (incl. liquids, solids and biogases)	5
Geothermal energy	15
Hydroelectricity	1,4
Nuclear	5
Hydrogen and fuel cells	21

Source: IEA, Kouvaritakis et al. [9].

Les taux d'apprentissage observés peuvent être très différents selon la technologie utilisée, laquelle est à son tour associée à une source d'énergie particulière. Par exemple, le taux d'apprentissage relatifs aux technologies produisant de l'électricité sont de 18% pour le photovoltaïque, 9% pour les éoliennes off-shore mais seulement 5% pour le nucléaire 4^{ème} génération. En suivant nos hypothèses et en appliquant ces taux d'apprentissage, un pays avec des budgets élevés en RD&D consacré au photovoltaïque présentera une meilleure adaptabilité qu'un autre pays investissant peu dans cette technologie, les autres budgets étant égaux.

Le tableau ci-après présente les données relatives aux budgets RD&D publics moyens pour les 18 pays de notre étude.

Table 5: Public RD&D budgets, 2005-2009

Country	Average annual public RD&D budget ^a	Country	Average annual public RD&D budget ^a
Finland	163,9952	Germany	583,9266
Czech Republic	33,602	Spain	101,8154
Belgium	113,317	Austria	66,2654
Hungary	141,494	Portugal	3,4792
Sweden	107,2338	Denmark	85,6682
Netherlands	198,726	United Kingdom	246,7
France	1056,176	Ireland	43,7142
Italy	462,7168	Greece	8,5688

Source: IEA

^a 2005-2009, in Million USD, 2010 prices and PPP

C.3. Formules et calculs

Si l'on prend en compte les trois éléments basiques transposés au domaine énergétique de la section précédente, alors la formule de la vulnérabilité systémique pour le pays i s'écrit de la façon suivante :

$$V_i = \frac{1}{I_2} \times \frac{TPES_i / Pop_i}{RDD_i * (1 + r_j) / pop_i}$$

Où I_2 est l'indice de diversité composée de Jansen *et al.* (2004), r_j le taux d'apprentissage de la technologie j et RDD_{ij} le budget RD&D du pays i concernant la technologie j . En utilisant les précédents tableaux de données, on peut à présent calculer l'indice de vulnérabilité systémique V_i de nos 18 pays. Les résultats sont donnés dans le tableau suivant.

Table 6: Systemic energy vulnerability indexes

Country	V_i	Country	V_i
Finland	0,15	Germany	0,3
Czech Republic	0,46	Spain	1,04
Belgium	0,73	Austria	0,26
Hungary	0,15	Portugal	3,74
Sweden	0,38	Denmark	0,14
Netherlands	0,4	United Kingdom	0,54
France	0,17	Ireland	0,35
Italy	0,35	Greece	1,27

Source: Author's calculation

Les indices de vulnérabilité systémique fournis par ce tableau doivent être comparés avec ceux de Jansen *et al.* (2004) précédemment donnés. La première observation issue de cette comparaison est que le cluster de pays présentant la plus faible vulnérabilité (inférieure à 0,3) est à présent composé de la Finlande, la Hongrie, la France, le Danemark, l'Autriche et l'Allemagne. Par rapport à I_2 , la nouveauté est la présence de la Hongrie et de la Finlande parmi les pays les moins vulnérables. Ce résultat nous permet d'estimer la contribution de l'adaptabilité dans le niveau de vulnérabilité. En fait, les budgets RD&D de la Hongrie et de la Finlande sont assez élevés comparés à la taille de leur population, mais surtout une large part est dédiée aux énergies renouvelables (qui sont comme nous l'avons vu associées à de fort taux d'apprentissage technologique).

Par ailleurs, le Portugal obtient un taux de vulnérabilité étonnamment élevé, alors que son indice de diversité est parmi les meilleurs. L'explication ici réside simplement dans le faible niveau de son budget RD&D, qui est trop faible pour compenser ses niveaux d'exposition et de sensibilité.

CONCLUSION

La première partie de ce rapport a présenté un survol d'éléments de la littérature sur la vulnérabilité énergétique. L'objet de cette partie était de recenser les différents indicateurs susceptibles d'être retenus dans les analyses multicritères produites dans les parties B et C.

La deuxième partie a présenté les résultats de l'analyse multicritère et préalablement la méthode retenue, à savoir ELECTRE TRI. Les arguments justifiant de l'emploi de cette méthode ont été évoqués et notamment le fait que l'objet de l'étude n'était pas de déterminer un classement ordinal des pays, mais bien de pouvoir les affecter à des catégories de pays plus ou moins vulnérables énergétiquement. L'intérêt de la méthode ELECTRE TRI est d'insister particulièrement sur l'analyse de sensibilité qui montre comment faire varier les résultats de l'analyse en revenant sur les dires d'experts ayant proposé les pondérations des critères, en revenant également sur les valeurs des seuils et des bornes qui fondent la méthode. Cette analyse de sensibilité permet de montrer toute l'importance de relativiser les résultats initialement obtenus. L'analyse produite sur les pays de l'Europe des 27, les BRICs et les Etats-Unis sur la base de deux notions de diversité (l'une intégrant la variété et les proportions relatives des énergies, l'autre y ajoutant la dissemblance entre les énergies) ne montre pas des résultats significativement différents. Il faut également souligner la difficulté d'utiliser dans cette méthode des indicateurs agrégeant un trop grand nombre de dimensions car la question de la pondération de ces dimensions devient problématique. C'est la raison pour laquelle nous n'avons pas étendu l'analyse à des indicateurs plus agrégés (incluant notamment la diversité des fournisseurs), ce qui était notre ambition au départ.

Dans la troisième partie, la transposition du concept de vulnérabilité systémique au problème de la sécurité d'approvisionnement énergétique nous a permis de proposer un nouveau cadre d'évaluation de la sécurité énergétique des pays. Comme nous l'avons souligné, ce cadre issu de l'écologie et des sciences dites de soutenabilité est une structure générale pouvant être utilisée comme base pour de futures évaluations de la vulnérabilité. L'avantage est l'homogénéisation des études qui serait alors possible et qui pallierait le

manque d'harmonisation des évaluations traditionnelles. Concernant les résultats en termes de classement des pays, il est intéressant de constater qu'ils sont assez proches de ceux produits dans la deuxième partie du rapport.

BIBLIOGRAPHIE

Awerbuch S. and Martin Berger (2003), *Energy security and diversity in the EU: a mean-variance portfolio approach*. IEA/IET Working Paper 2003/03, Paris

Berger, M. (2003), *Portfolio analysis of EU electricity generating mixes and its implications for renewable*, Ph.D.Dissertation, Technischen Universität, Vienna.

Brooks, H. (1986), *The typology of surprises*, In: Clark, W., Munn, R. (Eds.), *Technology, Institutions and Development, Sustainable Development of the Biosphere*. Cambridge University Press.

CEC, (1998), M. Feldman, *Final Report: Diversity and risk analysis in a restructured California electricity market*, Resource Decisions for California Energy Commission, Contract #500-96-019, San Francisco, October 1998

Colson G. et Makunza K.E. (1998), *Evaluation multicritère des firmes avec données imprécises*, FINECO, vol.8, n°1

Costantini, V., Gracceva, F., Markandya, A., Vicinia, G. (2007), *Security of energy supply: Comparing scenarios from a European perspective*, *Energy Policy* 35, 210–226.

Gallopin G. (2006), *Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity*, *Global Environmental Change* 16, 293–303

Gatsios, K. & Seabright, P. (1989), *Regulation in the European community*. *Oxford Rev. Econ. Policy* 5, 37–60.

Geroski, P. (1989), *The choice between diversity and scale*. In 1992: myths and realities (ed. E. Davis), pp. 29–45. London, UK: Centre for Business Strategy, London Business School.

Global Chance (2009), *Petit mémento énergétique de l'Union européenne*, Les Cahiers de Global Chance

Grubb, M., Butler, L., Twomey, P. (2006), *Diversity and security in UK electricity generation: the influence of low carbon objectives*. Energy Policy 34, 4050–4062.

Helm, D. (2002), *Energy policy: security of supply, sustainability and competition*. Energy Policy 30 (3), 173–184.

Helm, D. (2007), *European energy policy: meeting the security of supply and climate change challenges*. EIB Papers 12 (1), 30–49.

Hill, M. (1973). *Diversity and evenness: a unifying notation and its consequences*. Ecology 54, 2.

International Energy Agency (1985), *Energy technology Policy*, Paris.

International Energy Agency (1991), *Energy Policies of IEA Countries: 1990 Review*, IEA, Paris.

International Energy Agency (2001), *Toward a sustainable energy future*, OECD/IEA, Paris.

International Energy Agency (2002), *Electricity Information 2002*, IEA, Paris.

International Energy Agency (2007). *Energy Security and Climate Policy — Assessing Interactions*. IEA, Paris.

Jansen J.C. and A.J. Seebregts (2010), *Long-term energy services security: What is it and how can it be measured and valued*, Energy Policy 38, 1654–1664.

Jansen, J.C., Beurskens, L.W.M., Awerbuch, S., Stirling, A.C., (2005), *Portfolio and diversity analysis of energy technologies*. In: Bodde, David, Leggio, Karyl, Taylor, Marilyn (Eds.), *Understanding and Managing Business Risk in the Electric Sector*.

Kruyt, B., van Vuuren, D.P., de Vries, H.J.M, Groenenberg, H. (2009), *Indicators for energy security*, Energy Policy 37, 2166–2181.

Laxton, R. (1978), *The measure of diversity*. Journal of Theoretical Biology 70 (1), 51-67.

Le Gauffre et al. (2004), *Aide multicritère aux décisions de réhabilitation d'un réseau d'eau potable*, XXIIème Rencontres universitaires de génie civil

Leonard, R. et Jones, G. (1989), *Quantifying diversity in archaeology*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Luers A.L. (2005), *The surface of vulnerability : An analytical framework for examining environmental change*, *Global Environmental Change* 15, 214–223.

Luers A.L., D.B. Lobella, L.S. Sklard, C.L. Addamsa, and P.A. Matsona (2003), *A method for quantifying vulnerability, applied to the agricultural system of the yaqui valley, mexico*, *Global Environmental Change* 13, 255-267.

Martin C., Legret M. (2005), *La méthode multicritère ELECTRE III. Définition, principe et exemple d'application à la gestion des eaux pluviales en milieu urbain*, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*

May, R. (1975), *Patterns of species abundance and diversity*. In *Ecology and the evolution of communities* (eds M. Cody & J. Diamond), pp. 81–120. Cambridge, MA: Belknap Press/Harvard University Press.

Maynard Smith, J. (1989), *Trees, bundles or nets?* *Trends Ecol. Evol.* 4, 302–304.

Maystre L.Y., Pictet J., Simos J. (1994), *Méthodes multicritères ELECTRE*, Presses polytechniques et universitaires romandes

McCann, K. (2000), *The diversity–stability debate*. *Nature* 405, 228–233.

Moura P. (2008), *Méthode d'évaluation des performances des systèmes d'infiltration des eaux de ruissellement en milieu urbain*, thèse de doctorat, INSA de Lyon

N. Kouvaritakis, A. Soria, and S. Isoard, *Modelling energy technology dynamics: methodology for adaptive expectations models with learning by doing and learning by searching*, *International Journal of Global Energy Issues* 14 (2000), 1–4.

Nafi A., Wery C. (2009), *Aide à la décision multicritère : introduction aux méthodes d'analyse multicritère de type ELECTRE*, Module Ingénierie financière, ENGEES

National Economic Research Associates (2002), *Security in Gas and Electricity Markets, report to the Department of Trade and Industry*, London.

National Economic Research Associates (2002), *Security in Gas and Electricity Markets, report to the Department of Trade and Industry*, London, October.

Prime Minister's Strategy Unit, *The Energy Review*, UK Cabinet Office, February 2002.

Roques, F.A. et al. (2006), *Nuclear power: a hedge against uncertain gas and carbon prices?* The Energy Journal 27(4), pages 1-24.

Rumsfeld, D. (2002), *News briefing at the Department of Defense*, Washington DC, 12th.

Sagar A.D. and van der Zwaan B. (2006), *Technological innovation in the energy sector: R&d, deployment, and learning-by-doing*, Energy Policy 34, 2601–2608

Scheepers M., Seebregts A., de Jong J., Maters J. (2007), *EU standards for Energy Security of Supply-Updates on the crisis capability index and the supply/demand index quantification*, EU-27, ECN-E-07-004, 101p.

Skea, J. (2010), *Valuing diversity in energy supply*, Energy Policy 38, 3608–3621.

Stirling A. (2010), *Multicriteria diversity analysis: A novel heuristic framework for appraising energy portfolios*, Energy Policy 38, 1622- 1634.

Stirling, A. (1994), *Diversity and ignorance in electricity supply investment: addressing the solution rather than the problem*. Energy Policy 22, 195–216.

Stirling, A. (1997). *Multicriteria mapping: mitigating the problems of environmental valuation?* In: Foster, J. (Ed.), *Valuing Nature: economics, ethics and environment*. Routledge, London chapter.

Stirling, A. (2007). *A general framework for analysing diversity in science, technology and society*, Journal of the Royal Society Interface, 4 (15), pp.707–719.

Stirling, A. (2010), *Multicriteria diversity analysis: a novel heuristic framework for appraising energy portfolios*. Energy Policy 38, 1622–1634.

T. Vignolo, *Energy security and systemic vulnerability*, CREDEN working paper series, 2012.

van den Bergh, J., (2008), *Optimal diversity: Increasing returns versus recombinant innovation*, Journal of Economic Behavior and Organization 68, 565–580

Williamson, O., (1993), *Transaction cost economics and organisation theory*. *Industrial Economics and Corporate Change* 2, 107–156.